INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2022 · nº 544 · 6,90 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

FÍSICA CUÁNTICA | La no localidad cuántica en la era de las redes
EVOLUCIÓN | Arqueas: Las enigmáticas antecesoras de la vida compleja
SOSTENIBILIDAD | El poder de la agroecología



Tormentas de vapor

El aumento de la temperatura y la humedad atmosférica está intensificando los huracanes y las lluvias torrenciales

ÍNDICE

ARTÍCULOS

16 CAMBIO CLIMÁTICO
Tormentas de vapor

26 CONSERVACIÓN
Nuevos tratamientos para el cáncer del diablo de Tasmania

INFORME ESPECIAL: AGROECOLOGÍA

30 **El poder de la agroecología**

44 **Prácticas agrícolas basadas en la biodiversidad**

62 EVOLUCIÓN
Las enigmáticas antecesoras de la vida compleja

68 FÍSICA CUÁNTICA
La no localidad cuántica en la era de las redes

SECCIONES

02 APUNTES
Sonidos de lémur
Ritual sexual del escarabajo
Calentamiento volcánico
Amortiguadores sísmicos
Cocinar con láser
Relatos escatológicos del reino animal
Cebo para mosquitos
Susurros glaciares
Homininos hambrientos
Vidrio ultrarresistente

14 LA IMAGEN DEL MES
¿Cómo se colorean las imágenes astronómicas?

55 FILOSOFÍA DE LA CIENCIA
El concepto de función en biología y física

58 FORO CIENTÍFICO
El prospecto de los medicamentos debe simplificarse

60 PLANETA ALIMENTACIÓN
La moda de la «twincosmética»

80 JUEGOS MATEMÁTICOS
La evolución del juego de la vida



APUNTES

Los indris de Madagascar usan patrones temporizados repetitivos en sus extraordinarios cantos familiares.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

SONIDOS DE LÉMUR

El indri es el primer mamífero conocido que canta con ritmo, aparte del hombre

Los mamíferos profieren sonidos de todo tipo, pero sus voces raramente evocan musicalidad. ¿El culpable? La falta de ritmo: la secuencia temporal que organiza en un patrón repetible los sonidos y las pausas que los separan. El ser humano era hasta ahora el único mamífero dotado de sentido del ritmo, imprescindible para crear música. Con el objetivo de averiguar cómo pudimos adquirir el oído musical, los especialistas andan tras la búsqueda de facultades similares en otras especies.

Tal razón llevó hace poco a un equipo de investigadores a recorrer las junglas de Madagascar a pie, armados de micrófonos con que grabar el notable canto del indri (*Indri indri*). El aspecto de este lémur recuerda a un peluche desgarbado, de pelaje blanquinegro y ojos verdes de mirada penetrante. De carácter esquivo, acostumbra a vagar por las copas altas de la pluvisilva, por lo que no es fácil de ver, pese a ser el lémur más grande de todos. Escucharlo, por contra, no entraña dificultad; sus potentes gritos son reconocibles a más de un kilómetro y medio de distancia. Además de esos chillidos prodigiosos, interpreta un variado repertorio vocal, en el que destaca un agudo canto quejumbroso, que resuena por toda la selva.

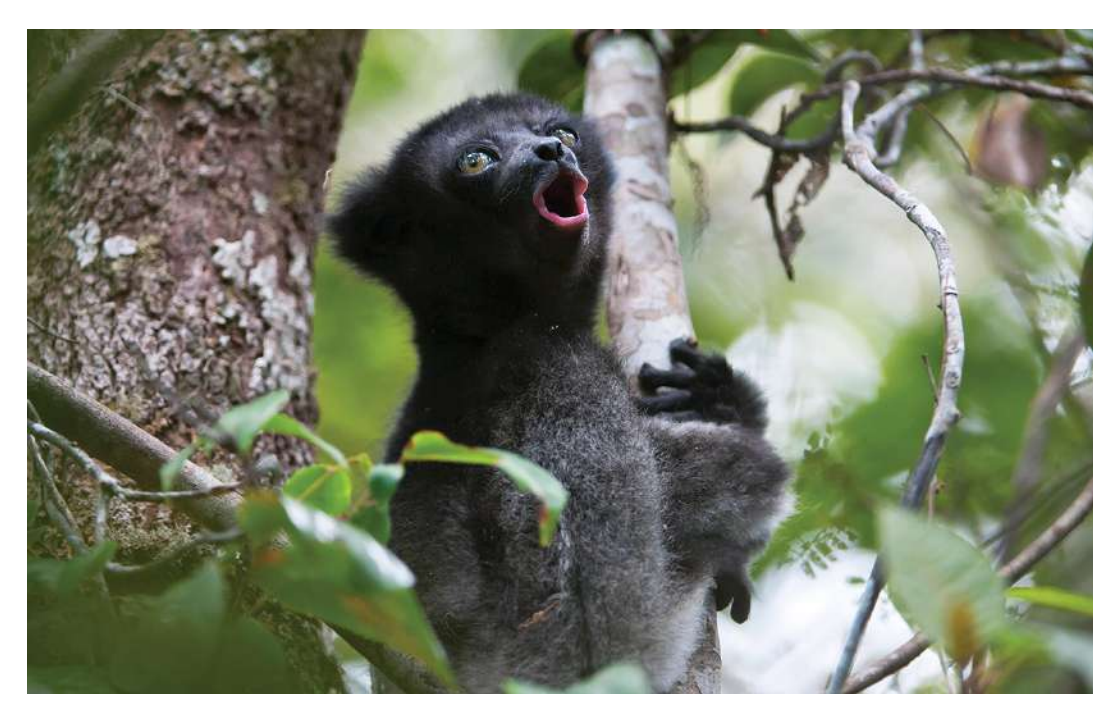
Los indris viven en grupos familiares y esos cantos distintivos facilitan la comunicación entre ellos. Como una banda familiar, los adultos interpretan duetos profundos y tristes a los que los jóvenes se suman con un coro cacofónico. Andrea Ravignani, biomusicólogo en el Instituto Max Planck de Psicolingüística de Nimega, define los cantos como «cautivadores».

Chiara De Gregorio, bióloga de la Universidad de Turín, asegura que al principio parecen caóticos, pero a medida que uno los escucha más y más, cada vez lo son menos. «Cuando uno se habitúa a oírlos, alcanza a distinguir un auténtico patrón en ellos. Cuando inician una frase, sabes lo que vendrá después, nota a nota», relata. En un nuevo estudio publicado en *Current Biology*, De Gregorio, Ravignani y otros colaboradores analizaron las grabaciones de los cantos de 636 individuos pertenecientes a 20 clanes familiares, para determinar si este lémur cantarín imprime un verdadero ritmo a sus vocalizaciones.

Sin cadencia no hay ritmo, así que el equipo descompuso cada grabación en sus elementos básicos para medir la duración de las notas y de las pausas intercaladas. Al comparar la duración de los intervalos entre cada sonido comprobaron que los cantos se suelen descomponer en intervalos rítmicos 1:1 (cuando los intervalos entre los sonidos son de idéntica duración, como cantar al compás de un metrónomo) o 1:2 (cuando el primer intervalo dura la mitad que el segundo). Ambos son habituales en la música.

Según los autores, del estudio se desprende que el indri se sirve de esos patrones para organizar el canto, lo que lo convierte en el primer mamífero —amén de nuestra especie— dotado de ritmo categórico parecido al humano. Este hallazgo es extensivo a todos los individuos que han sido grabados; las hembras y los machos cantaban con tempos distintos, pero ambos empleaban los mismos patrones rítmicos. De igual modo, eran capaces de mantener un ritmo constante conforme disminuían el tempo del canto

PÁGINA PRECEDENTE: NICK GARBUTT/NATURE PICTURE LIBRARY/ALAMY STOCK PHOTO



Un indri juvenil, de dos meses.

(esto es, reducían la velocidad de la interpretación), una variación conocida en la música clásica como *ritardando*.

Aunque los indris y los compositores humanos compartan algunas estructuras similares, adquirieron esas habilidades musicales de forma independiente. El ancestro común de ambos vivió hace 77,5 millones de años, un lapso muy dilatado que hace improbable que el ritmo fuese un rasgo ancestral. Ravignani plantea como explicación alternativa que presiones sociales similares convirtieron a ambos en cantantes en momentos distintos, lo que representa un ejemplo de evolución convergente. De momento se ignora qué ventajas concretas otorga esta habilidad a los indris, pero los descubridores especulan con que la organización de los cantos en patrones repetibles facilitaría el aprendizaje de los jóvenes, o quizá la rápida coordinación de las familias cuando han de defender su territorio o reunirse.

Elizabeth St. Clair, antropóloga física de la Universidad Johns Hopkins y estudiosa de la evolución del aparato fonador de los primates, confiesa estar sorprendida por las similitudes rítmicas de los cantos del indri y las canciones humanas. «Parece ser una característica privativa de este lémur, que no se observa en otros muchos mamíferos, ni siquiera en las aves», asegura esta especialista ajena al estudio novedoso. St. Clair sospecha que los gibones, pequeños simios superiores del sudeste asiático conocidos por coordinar sus cantos, también podrían recurrir al ritmo para darles estructura.

La disección de los cantos del indri indica que este prosimio comparte el sentido del ritmo con el ser humano, pero ello genera más preguntas acerca del modo en que se comunica. Los investigadores esperan que el estudio del lémur en este aspecto impulsará las campañas de conservación que con tanta urgencia se precisan para asegurar la supervivencia de los primates. La desforestación y la caza han diezmado las poblaciones de este lémur (también las del gibón), hasta el punto de que algunos expertos cifran la población en libertad en un escaso millar de individuos, y todo apunta a que la cifra irá a la baja. Las previsiones indican que en 2070 habrá desaparecido el 93 por ciento de los bosques y las selvas de Madagascar.

Si queremos saber por qué los primates comenzaron a usar la música, es esencial seguir estudiando el canto del indri. «El sistema de comunicación es una ventana indirecta a su mente», afirma Ravignani. «Los lémures guardan multitud de secretos en su cabeza y analizar su producción sonora nos permitiría descubrirlos.»

Jack Tamisiea

ENTOMOLOGÍA

RITUAL SEXUAL DEL ESCARABAJO

El cortejo oral es clave en la cópula de un escarabajo desertícola



Escarabajos desertícolas de Mongolia.

Un día que el investigador Xinghu Qin se aventuró en un pastizal limítrofe con el desierto de Hunshandake, en Mongolia Interior, presenció un comportamiento sorprendente en dos pequeños escarabajos que se apareaban sin recato al raso: uno de ellos lamía sin cesar el «trasero» del otro.

«¿Qué demonios estaban haciendo?», se preguntó Qin, entonces estudiante de posgrado en la Academia China de Ciencias Agrícolas.

Los protagonistas eran escarabajos desertícolas de Mongolia (*Platyope mongolica*), que pasan la mayor parte del tiempo al abrigo de los matorrales y bajo la arena y solo emergen en el momento del apareamiento. En *Ecology and Evolution*, él y sus colaboradores describen un inédito ritual sexual de carácter oral que el macho de este coleóptero supuestamente debe practicar a la hembra como preámbulo de la cópula.

«Hemos observado el autolamido en numerosos animales. Pero que el macho o la hembra laman la genitalia de la pareja, sobre todo en coleópteros u otros insectos, es realmente raro», explica Matjaž Gregorič, entomólogo en el Instituto de Biología Jovan Hadži, de Eslovenia, que no ha participado en el estudio.

Cuando un escarabajo desertícola mongol encuentra una candidata, comienza a frotar la genitalia de la hembra con su prominente palpo maxilar, una pieza bucal. Si no la complace, esta sale corriendo. Y cuanto más tiempo dedique a este ritual de cortejo oral, menos tardará en consumar la cópula después.

Gregorič y su equipo descubrieron en 2016 un comportamiento parecido en la araña de corteza de Darwin (*Caerostris darwini*). Daisuke Yamamoto, entomólogo del Instituto Nacional de Tecnologías de la Información y la Comunicación de Japón, también ha descrito el fenómeno en la mosca del vinagre (*Drosophila melanogaster*). «Creemos que el lamido de la genitalia femenina por el macho [de la mosca del vinagre] forma parte de la detección de las feromonas, pero también podría ser una suerte de obsequio nutritivo, u obsequio nupcial, de la hembra», explica Yamamoto.

Conocer mejor ese tipo de comportamientos ayudará a saber de qué forma la selección sexual ha modelado la evolución de los coleópteros. Raramente observadas, esas prácticas sexuales complejas podrían ser más habituales de lo supuesto en el mundo de los insectos, pero según Qin son bastante desconocidas porque «esta clase de invertebrados sigue siendo poco estudiada.»

Gregorič añade que «si la gente conociese curiosidades interesantes de los animales, aunque se trate de escarabajos o de arañas, tendrían una actitud un poco más positiva hacia ellos, y eso siempre es constructivo de cara a la conservación».

Saugat Bolakhe

XINGHU QIN

CLIMA

CALENTAMIENTO VOLCÁNICO



La Calzada del Gigante, en Irlanda del Norte, forma parte de la Provincia Ígnea del Atlántico Norte.

Las erupciones prehistóricas llevaron el clima a un punto crítico

Los climatólogos llevan décadas alertando sobre los «puntos críticos», momentos en los que el calentamiento global moderno podría desatar una cascada de efectos irreversibles. Y los geólogos ya han empezado a identificar coyunturas similares en el registro fósil. Hace unos 56 millones de años, por ejemplo, cuando nuestros antepasados primates aún saltaban en los árboles, las erupciones volcánicas pudieron provocar un efecto invernadero que alteró diversos procesos, desde la evolución hasta la dirección de las corrientes oceánicas. Estudiando las variaciones climáticas del pasado, los geólogos esperan predecir las drásticas alteraciones que podría sufrir nuestro mundo como consecuencia del actual cambio climático provocado por el hombre.

Los investigadores conocen desde hace tiempo el denominado Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (MTPE), un periodo excepcionalmente cálido de la historia de la Tierra, si bien su causa ha suscitado intensos debates. Ahora, en un artículo publicado en *Nature Communications*, el experto del Servicio Geológico Británico Sev Kender y sus colaboradores presentan pruebas de que las erupciones volcánicas en el Atlántico Norte fueron cruciales para esta ola de calor.

Los indicios proceden de un testigo de sedimentos extraído en una acumulación de rocas submarinas próxima a Islandia. Esta zona, conocida como la Provincia Ígnea del Atlántico Norte, se formó a partir del magma que fluyó a la superficie terrestre hace más de 50 millones de años. Ya se sospechaba que existía una relación entre la actividad volcánica que creó esas rocas y el MTPE, explica Kender, de modo que a su equipo enseguida le llamó la atención la cantidad de mercurio contenida en la muestra de sedimentos.

Los picos de mercurio en los testigos de roca son un indicador de actividad volcánica, y los niveles que halló el equipo de Kender sugieren que las erupciones del Atlántico Norte se produjeron en el momento adecuado y con la intensidad necesaria para aumentar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Una vez que los volcanes se apagaron, las temperaturas continuaron subiendo.

Ran Feng, geocientífica de la Universidad de Connecticut ajena a la investigación, considera «muy intrigante» la coincidencia temporal entre las erupciones y el inicio del MTPE. El estudio propone que los gases volcánicos de efecto invernadero calentaron el planeta hasta llevarlo a un punto crítico climático. Y eso habría liberado el carbono encerrado en otros lugares, acentuando aún más el calentamiento global. Según Feng, la hipótesis podría ponerse a prueba con datos adicionales, como indicadores geológicos del dióxido de carbono presente en la atmósfera y los océanos durante ese período.

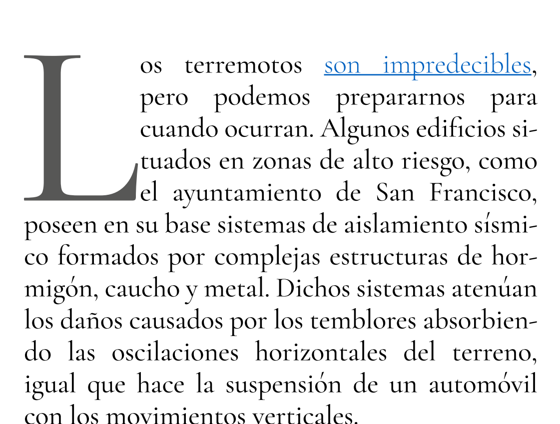
Estudiar la concentración de mercurio en rocas que datan del MTPE constituye un método prometedor para esclarecer qué ocurrió en aquella época, afirma Benjamin Black, geólogo del City College de Nueva York que no participó en el nuevo estudio. Además de precisar el papel que desempeñó la actividad volcánica en el MTPE, los geólogos confían en dilucidar cómo se desarrolló ese proceso, añade Black. «Los momentos del pasado remoto de la Tierra, como el MTPE, proporcionan valiosos puntos de comparación para comprender el comportamiento de los sistemas climáticos bajo presión», incluido nuestro clima actual.

Riley Black

CLEARVIEW/ALAMY STOCK PHOTO

INGENIERÍA

AMORTIGUADORES SÍSMICOS



Las pelotas de tenis usadas ofrecen protección de bajo coste contra los temblores

Los terremotos son impredecibles, pero podemos prepararnos para cuando ocurran. Algunos edificios situados en zonas de alto riesgo, como el ayuntamiento de San Francisco, poseen en su base sistemas de aislamiento sísmico formados por complejas estructuras de hormigón, caucho y metal. Dichos sistemas atenúan los daños causados por los temblores absorbiendo las oscilaciones horizontales del terreno, igual que hace la suspensión de un automóvil con los movimientos verticales.

Pero esas adaptaciones son caras. Jian Zhang, ingeniera de la Universidad de California en Los Ángeles, afirma que incluir aislamiento sísmico puede encarecer los costes de construcción hasta en un 20 por ciento. Aunque la inversión acabaría quedando amortizada, en algunas regiones propensas a los terremotos los constructores quizá no cuenten con el presupuesto necesario por adelantado.

Un nuevo método de aislamiento sísmico inspirado en la física de la rodadura ofrece una alternativa más sencilla y asequible, basada en materiales muy fáciles de conseguir: pelotas de tenis usadas. «Mucha gente juega al tenis y no sabe qué hacer con las pelotas después de cada partido», expone Michalis Vassiliou, ingeniero sísmico de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich.

El equipo de Vassiliou se inspiró en una antigua forma de aislamiento sísmico que consiste en hacer que un edificio que tiembla ruede hasta acabar deteniéndose, como si fuera un monopatín en un medio tubo. Si un edificio se separa del suelo mediante una capa de esferas o cilindros alojados en hendiduras cóncavas, estos rodamientos convierten las erráticas sacudidas horizontales en un suave bamboleo que va extinguiéndose debido al rozamiento. Este método ya se usó hace 5000 años en las pirámides peruanas, pero hoy los constructores prefieren otros sistemas de aislamiento más costosos.

En su versión moderna del aislamiento sísmico basado en la rodadura, detallada en *Frontiers in Built Environment*, los investigadores inyectaron mezclas similares al cemento en cientos de pelotas que ya no botaban bien, obtenidas en clubes de tenis cercanos. Construyeron un prototipo económico colocando cuatro pelotas rellenas entre dos losas de hormigón y comprobaron que resistía las sacudidas de un seísmo simulado. Cada pelota soportó una fuerza de ocho kilonewtons, aproximadamente el doble de lo experimentaría un sistema de aislamiento bajo una casa de una planta. Las pelotas debían contener la cantidad precisa de mezcla (los investigadores las rellenaron con una manga pastelera) para amortiguar las vibraciones sin agrietarse.

Zhang, que no participó en el estudio, considera que la técnica es interesante y podría dar respuesta a una necesidad insatisfecha. No obstante, advierte de que los resultados aún son preliminares, algo en lo que coincide Vassiliou. El próximo paso será crear un prototipo con cientos de pelotas de tenis y ponerlo a prueba en un centro de investigación de Cuba, un país propenso a los terremotos y que podría beneficiarse mucho de este tipo de sistemas.

Vassiliou asegura que ha obtenido financiación para probar el sistema sobre el terreno y colaborar con científicos locales en la mejora del dispositivo. «Si queremos implantarlo», incide, «hay que desarrollarlo con los ingenieros de los países de renta baja para que responda a sus necesidades reales».

Maddie Bender

GETTY IMAGES/DI PHOTOGRAPHY/ISTOCK

TECNOLOGÍA

COCINAR CON LÁSER



Diseñan una impresora 3D que cocina los platos a la vez que los crea

Los menús *gourmet* del futuro podrían incluir platos preparados con complejas técnicas de cocción y con una presentación esmerada, y todo ello sin más que apretar un botón. Los ingenieros mecánicos de la Universidad de Columbia han diseñado una impresora 3D capaz de producir y cocinar platos simultáneamente con una precisión milimétrica.

La prueba de concepto, descrita en *npj Science of Food*, consta de un fogón (de un tamaño similar al de cinco teléfonos móviles apilados) que emite radiación láser en distintas longitudes de onda y una impresora de alimentos con las dimensiones de un microondas. A medida que el brazo robótico del dispositivo va depositando finas capas de puré de pollo, un haz de alta potencia zigzaguea sobre ellas y cocina la carne con exquisita precisión. «Es casi como usar un soplete para hacer una *crème brûlée*», indica Jonathan Blutinger, experto en cocina digital de la Universidad de Columbia y primer autor del artículo, pero con «mucho más control y opciones de personalización». Los investigadores solo experimentaron con pollo, pero el sistema podría usarse con otros alimentos.

Blutinger asegura que las ventajas de este tipo de sistemas controlados por *software* van más allá de la aplicación de complejas texturas y presentaciones: algún día también podrían leer códigos QR para preparar automáticamente menús adaptados a los hábitos alimentarios y las restricciones dietéticas de cada persona.

El sistema, que según los investigadores es el primero en combinar un fogón láser con una impresora 3D de alimentos, emplea distintas longitudes de onda para cocinar de diferentes formas: un láser azul de onda corta penetra profundamente en la carne, mientras que los haces infrarrojos (con mayor longitud de onda) asan o doran la superficie. Eso permite obtener resultados muy elaborados, como podría ser una hamburguesa con un ajedrezado de porciones poco hechas y muy hechas.

La nueva técnica es «asombrosa», opina Megan Ross, experta en alimentación que estudia la impresión 3D en el Colegio Universitario de Cork y no intervino en el proyecto. Ross señala que el diseño se halla en una fase incipiente y aún deben abordarse numerosos retos técnicos, como evitar la contaminación cruzada entre las capas de carne cruda y cocinada. Aun así, se muestra impresionada por la capacidad del dispositivo para producir platos fuera del ámbito de la cocina convencional. «¿Se venderá en las tiendas dentro de unos años? No», sentencia. «Pero por algo se empieza.»

En comparación con el pollo impreso en 3D y asado en un horno tradicional, la versión cocinada con láser conservaba casi el doble de peso y volumen. «Ese pollo estará jugoso», afirma Liam MacLeod, chef de Denver que trabajó en la impresión 3D de alimentos en el Instituto Culinario de Estados Unidos y no tomó parte en el estudio.

MacLeod no cree que la técnica vaya a reemplazar a los cocineros, pero podría «sumarse a su arsenal de herramientas» para ofrecer nuevas experiencias sensoriales. «La cocina es un arte que se ha practicado y perfeccionado durante miles de años», concluye. «Es muy emocionante concebir algo nuevo y único que la gente aún no ha experimentado.»

Huanjia Zhang

THOMAS FUCHS

COMPORTAMIENTO ANIMAL

RELATOS ESCATOLÓGICOS DEL REINO ANIMAL


Las vacas aprenden a usar el retrete.

Las heces cúbicas de los uombats, las señales secretas de la orina y la insólita estrategia de los pandas para mantenerse calientes

Orinar es sencillo; aguantarse no tanto. En los animales hallamos ejemplos, como el del lobo, que controlan a voluntad los esfínteres como medio de marcaje del territorio, en tanto que otros, como el ganado bovino, vagan despreocupados por los pastos orinando con aparente desidia. «Uno tiene la impresión de que no controlan la micción», afirma Jan Langbein, psicólogo animal en el Instituto de Biología de los Animales de Granja, de Alemania. «Se puede enseñar a los perros y a los caballos. Así que pensamos: ¿por qué no a las vacas?»

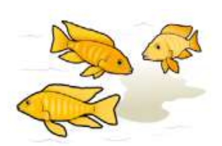
En su estudio publicado en *Current Biology*, Langbein y sus colaboradores describen el adiestramiento de 16 terneros en el uso de un orinal durante sesiones de 45 minutos a días alternos. Primero los encerraron en un retrete especialmente diseñado para la ocasión (llamado MooLoo), donde recibían alimento por un orificio abierto en la pared si orinaban en él. Una vez que asociaron la recompensa con el uso, se les dejó salir. Si el ternero volvía por iniciativa propia al retrete y orinaba, se le volvía a recompensar, pero si se aliviaba fuera de él, se le pulverizaba con agua durante tres segundos.ina es un arte que se ha practicado y perfeccionado durante miles de años», concluye. «Es muy emocionante concebir algo nuevo y único que la gente aún no ha experimentado.»

Al cabo de diez días de entrenamiento, 11 de los terneros usaban el retrete aproximadamente un 77 por ciento del tiempo, lo cual demuestra que los bovinos aprenden a usar el mingitorio sin grandes dificultades. Como paso siguiente, el equipo plantea automatizar el sistema en una granja, sin tanta supervisión.

La recogida de la orina en las granjas de vacuno ayudaría a controlar la contaminación, las emisiones de gases de efecto invernadero y la propagación de las zoonosis, explica Patricia Yang, ingeniera mecánica en la Universidad Nacional Tsing Hua de Taiwán, que no ha participado en el estudio. «Si lográsemos tratar las deyecciones líquidas y sólidas de los animales del mismo modo que las nuestras, erradicaríamos esas enfermedades», concluye. *Nikk Ogasa*



Las heces del uombat son cúbicas y durante mucho tiempo nadie supo la razón. Sorprendidos por las cagarrutas tan peculiares que este marsupial defeca cada día en cantidad de hasta cien, Yang y sus colaboradores diseccionaron ejemplares que habían muerto atropellados. Así averiguaron que las paredes del intestino albergan unos surcos que dan esa geometría de cubo a las heces cuando se contraen. La singular forma impide que rueden por el suelo, lo que ayudaría a marcar mejor el territorio.



La orina habla por sí misma, cuando menos la de algunos peces. Interesado en la comunicación a través de señales no visuales, un equipo de investigación separó a parejas de cíclidos en un acuario con una barrera transparente. A continuación, se le inyectó colorante a uno de ellos para hacer visible la orina. Cuando este pez veía a otro, se acercaba a la barrera y miccionaba. Y cuando la barrera se perforó para que la orina penetrase al otro lado, el comportamiento de los peces cambió: los pequeños adoptaron una actitud más sumisa frente a los grandes.



Al oso panda le encanta el estiércol de caballo, pues se ha visto a individuos de esta emblemática especie embadurnarse con las boñigas. Semejante comportamiento despertó la curiosidad de unos investigadores, que en el curso de experimentos descubrieron que dos compuestos presentes en el estiércol fresco neutralizan una proteína propia de los pandas que alerta al cuerpo del frío, lo que hace pensar que la unción insensibilizaría a estos animales frente al frío intenso.

BIOLOGÍA

CEBO PARA MOSQUITOS

Una sustancia segregada por el parásito responsable del paludismo atrae los mosquitos a un cebo mortífero

Las alternativas vegetarianas a la carne se están abriendo paso desde los blogs de cocina hasta los restaurantes de tres estrellas y pronto podrían figurar en menús destinados a comensales ciertamente distintos. Un nuevo estudio publicado en *Communications Biology* muestra que es posible engañar a los mosquitos con un sucedáneo de la sangre a base de zumo de remolacha envenenado.

Según S. Noushin Emami, biólogo especialista en infecciones de la Universidad de Estocolmo y autor principal del estudio, las enfermedades transmitidas por los mosquitos matan cada año a más de 700.000 personas, de las que el paludismo se cobra más de la mitad. Una estrategia de control aplicada a estos dípteros mortíferos consiste en mezclar un veneno con un cebo azucarado. El inconveniente estriba en que el azúcar también atrae a otros insectos, que caen víctimas del veneno destinado a sus vecinos hematófagos.

Los grandes problemas sanitarios que afectan al mundo exigen soluciones sencillas si queremos que funcionen, cree Lech Ignatowicz, director de Molecular Attraction, una empresa incipiente que fundó con Emami con el objetivo de luchar contra tales enfermedades. Los dos investigadores y sus colaboradores quieren crear un atrayente para mosquitos que sea asequible, escalable y específico. En primer lugar, necesitaban un componente básico que no fuera sangre, puesto que la sangre exenta de sustancias contaminantes es difícil de encontrar y conservar, además de cara. ¿La solución? Zumo de remolacha. Ignatowicz explica que en Suecia abunda esta hortaliza y que el intenso color morado de su zumo es visible en el vientre de los mosquitos, de modo que es fácil comprobar si lo han ingerido. Eso sí, convencerlos de que adopten una dieta vegetariana ha exigido ciertas dosis de persuasión.

En 2017, el grupo de Emami descubrió que el protozoo *Plasmodium falciparum*, uno de los parásitos causantes del paludismo, segrega en la sangre del animal infectado una sustancia denominada HMBPP (pirofosfato de (E)-4-hidroxi-3-metilbut-2-enilo). Esta actúa como un estimulante del apetito, que impulsa al mosquito a cebarse con la sangre plagada de protozoos, de tal modo que el parásito puede pasar a nuevos hospedadores a través de las picaduras.

«Para un mosquito es como si el HMBPP supiera a un filete jugoso y sangriento», compara Emami. En el estudio, el zumo de remolacha que contenía una pizca de HMBPP atrajo hasta cinco veces más mosquitos que el zumo normal. Emami afirma que esta sustancia garantiza que el zumo los atraiga únicamente a ellos, que tomarán el cebo con el insecticida incorporado. El equipo también está pensando en alternativas naturales a los venenos probados, con el objetivo de encontrar un compuesto que solo sea nocivo para los mosquitos.

A Kristina Gonzales-Wartz, bióloga especialista en enfermedades infecciosas de la Universidad estatal de Arizona, sin relación alguna con el estudio, le gusta la idea de emplear el HMBPP como atrayente específico. «Es muy innovador, ¿pero funcionará a gran escala?», se pregunta.

Los inventores trabajan ahora en la adaptación del cebo al uso comercial, proceso que podría exigir la sustitución de la remolacha por otras plantas más conocidas, y baratas, en las zonas donde el paludismo es un mal endémico. También están experimentando con aplicaciones en el campo, como la fumigación de las hojas para que los mosquitos beban el producto.

Annie Melchor

LECH IGNATOWICZ

GEOLOGÍA

SUSURROS GLACIARES


El monte Eiger

Desarrollan una técnica que emplea infrasonidos para detectar avalanchas de hielo

En 2017, un bloque de hielo del tamaño de un dirigible se desprendió de un glaciar del monte Eiger, en los Alpes suizos. Parte del estruendo que produjo tenía un tono demasiado grave para que lo percibiera el oído humano. Sin embargo, tales vibraciones resultan clave para determinar las características de una avalancha.

Las ondas sonoras de baja frecuencia, o infrasonidos, que recorren grandes distancias a través de la atmósfera ya se usan en la vigilancia remota de volcanes activos. Ahora, algunos expertos de ese campo han cambiado el fuego por el hielo, al centrarse en las peligrosas placas que se desprenden de los glaciares. Ya se habían analizado los infrasonidos de los aludes de nieve, pero nunca se había abordado el hielo, según Jeffrey Johnson, geofísico de la Universidad Estatal de Boise que no participó en el estudio, aunque ha colaborado con el autor principal en otros trabajos. «Esto es distinto», afirma Johnson. «Se ha detectado [la señal de] un nuevo material con infrasonidos.»

Los infrasonidos pueden registrarse por medio de sensores que captan perturbaciones minúsculas en la presión del aire. Los glaciares suelen moverse demasiado despacio para generar ese tipo de señales, pero durante un desprendimiento (una ruptura rápida y repentina del hielo del cuerpo principal del glaciar) se producen grandes cantidades de infrasonidos. Los desprendimientos glaciares desencadenan avalanchas que suponen un peligro creciente para los habitantes de las regiones montañosas, a medida que el aumento de las temperaturas debilita las grandes extensiones de hielo. Un glaciar «puede despegarse del terreno debido al deshielo, y eso provoca mayores fracturas», explica Emanuele Marchetti, geólogo de la Universidad de Florencia y autor principal del nuevo estudio, publicado en *Geophysical Research Letters*.

Los científicos buscan nuevas maneras de vigilar y detectar tales avalanchas de hielo. A menudo emplean radares, un método preciso pero que resulta caro y solo sirve para estudiar un emplazamiento concreto y los aludes adyacentes. Marchetti afirma que usar infrasonidos reduce los costes y permite detectar desprendimientos en un área mucho más amplia, así como múltiples avalanchas en una misma montaña.

Sin embargo, es difícil separar las distintas componentes de una señal (entre las que puede haber ruido de tráfico o de seísmos cercanos) si no se dispone de mediciones adicionales, explica Małgorzata Chmiel, glacióloga de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich ajena al estudio. «El modelo que ha usado el equipo de Marchetti constituye una primera aproximación a este problema», añade. Al aislar la señal relevante, ese modelo permitió que los investigadores estudiaran a distancia la velocidad, la trayectoria y el volumen de una avalancha de hielo mediante infrasonidos.

Marchetti y sus colaboradores tratan ahora de mejorar sus sensores para captar más eventos en las regiones europeas de riesgo, y han establecido colaboraciones por todo el continente para comprender mejor las señales que producen los glaciares al desmoronarse. También están refinando su análisis matemático a fin de determinar los detalles físicos de cada cascada de hielo.

Ellis Avallone

GETTY IMAGES/MICHAL BALADA/ISTOCK

GENÉTICA

HOMININOS HAMBRIENTOS

En épocas de hambruna merece la pena ser menudo

Hace cosa de un millón de años, una pequeña mutación pudo brindar una ventaja decisiva a los humanos primitivos. Un reciente estudio publicado en *Science Advances* indica que una variante o alelo de un segmento esencial del ADN que codifica el gen del receptor de la hormona del crecimiento (somatotropina) protege contra el hambre, en parte al limitar la talla corporal del individuo durante los períodos de privaciones. El alelo estaba muy difundido en *Homo sapiens* y sus parientes, pero su frecuencia se desplomó bruscamente hace unos 40.000 años, sobre todo en Eurasia y Asia oriental. En la actualidad numerosas personas aún lo presentan.

Las investigaciones precedentes habían vinculado el alelo en cuestión, el *GHRd*3, con rasgos como la talla pequeña al nacer y la madurez sexual precoz, así como con otras cualidades ventajosas cuando el alimento no abunda, explica el autor principal del estudio, Omer Gokcumen, antropólogo en la Universidad de Buffalo. Pese a ello, los especialistas quieren saber con más precisión qué papel ha desempeñado la mutación en la evolución humana.

Para ahondar en la cuestión, Gokcumen y sus colaboradores recurrieron a los ratones. O más bien convirtieron algunos de estos roedores en análogos de los humanos primitivos. Con la herramienta de edición génica CRISPR-Cas9, el equipo eliminó un pedazo del gen del receptor de la somatotropina murina para que se asemejara al alelo *GHRd*3. Los ratones modificados no difirieron sustancialmente de los normales mientras recibieron con regularidad alimento. Pero cuando se les sometió a una dieta estricta, los machos portadores del alelo se desarrollaron con una menor estatura que sus congéneres normales. El equipo de Gokcumen comprobó asimismo que, en un grupo de 176 niños que habían sobrevivido a la desnutrición en época actual, los síntomas no habían revestido tanta gravedad en los niños y las niñas que eran portadores del *GHRd*3.

Tales hallazgos ayudarían a explicar por qué este alelo ha persistido tanto tiempo. Quizá en las épocas de hambruna valió la pena no crecer demasiado, especulan los investigadores, si bien en épocas de abundancia la talla grande habría prevalecido. Las variaciones en los recursos disponibles habrían compensado los costes y los beneficios de los diferentes alelos en cada población. «Es una solución de compromiso. A mí me hubiera ido mucho mejor que a Arnold Schwarzenegger si ambos hubiésemos contado con 1000 kilocalorías diarias», afirma Gokcumen.

La explicación del equipo es «plausible», opina Megan Dennis, genetista de la Universidad de California en Davis, ajena al estudio. Elogia los experimentos funcionales con ratones, pero puntualiza que el gen afectado interviene en tantos procesos básicos que resulta difícil precisar los principales efectos adaptativos del *GHRd*3.

Por su parte, los investigadores del estudio se siguen preguntando qué pudo motivar el declive del alelo hace unos 40.000 años. El cambio climático, la migración y la aparición de útiles de caza y pesca mejorados pudieron influir. O pudo ser algo totalmente distinto, confiesa Gokcumen: «Esa fue una época muy extraña de la evolución humana».

James Dinneen

THOMAS FUCHS

MATERIALES

VIDRIO ULTRARRESISTENTE


Nácar en el interior de la concha de un molusco.

Un nuevo vidrio compuesto imita la estructura en capas del nácar

La resistencia y dureza del nácar, un material iridiscente que recubre algunas conchas marinas, emana de su estructura, que consta de fragmentos de mineral quebradizo dispuestos en capas y unidos por proteínas blandas. Los investigadores han usado el mismo principio para desarrollar un vidrio compuesto muy resistente que algún día podría dar lugar a parabrisas o pantallas de teléfonos móviles casi irrompibles, entre otros productos que hoy se fabrican con diversos tipos de vidrio tratado.

El nuevo material combina finísimas láminas de vidrio rígido (de un grosor inferior a la centésima de milímetro) con una resina acrílica flexible. «Al juntar esos dos componentes como en el nácar, recuperamos las mejores cualidades de cada uno de ellos», afirma Allen Ehrlicher, bioingeniero de la Universidad McGill y coautor de un artículo publicado en *Science* donde se describe el compuesto.

Tanto el vidrio como la resina acrílica son transparentes, pero la luz viaja a distinta velocidad a través de ellos. Como resultado, los intentos previos de combinarlos producían una sustancia demasiado opaca. Para solventarlo, los autores añadieron pequeñas cantidades de un hidrocarburo a la resina, hasta lograr que interactuara con la luz de manera parecida al vidrio.

El resultado no solo es transparente, indica Ehrlicher, sino también un 400 por ciento más fuerte y un 650 por ciento más resistente a los daños que el material empleado en los parabrisas de los coches (resina intercalada entre dos hojas de vidrio). Además, la nueva sustancia se puede cortar y perforar con herramientas normales.

Ehrlicher compara la estructura de láminas de vidrio apiladas y unidas por resina acrílica con una pared de ladrillos dispuestos en capas escalonadas: cualquier grieta que se propague en el nuevo material seguirá un camino enrevesado a lo largo de las juntas acrílicas, de modo que precisará más energía para generar una fractura. «Al obligarla a recorrer una trayectoria más larga, a atravesar una gran cantidad de esa sustancia conectiva (de «mortero», por así decirlo), creamos un material muy muy resistente», asegura.

Para construir las capas, los investigadores mezclaron los componentes en una centrifugadora. Es una técnica sencilla, y eso implica que el compuesto «podría fabricarse a una escala mayor que la de otros nácares sintéticos», afirma Lara Estroff, científica de materiales de la Universidad Cornell ajena al estudio. Con el tiempo, esa simplicidad podría traducirse en una gran variedad de aplicaciones.

Arun Varshneya, presidente de la compañía Saxon Glass Technologies que tampoco intervino en el proyecto, señala que el material aún es menos transparente que el vidrio y más propenso a los arañazos superficiales. No obstante, admite estar «entusiasmado con este valiente intento en la dirección correcta». Varshneya alaba la resistencia del compuesto en todos sus puntos, que contrasta con la del vidrio reforzado químicamente que se emplea en las pantallas de los teléfonos móviles (cuyo endurecimiento se limita a una fina capa superficial).

Ehrlicher espera seguir mejorando la transparencia y la resistencia a los arañazos del nuevo material sin renunciar a su notable dureza. «No hubo más remedio que alcanzar un compromiso entre transparencia y resistencia, resistencia y rigidez, o trabajo de fractura y rigidez», explica. «Y hemos obtenido el equilibrio óptimo entre todos esos aspectos.»

Sophie Bushwick

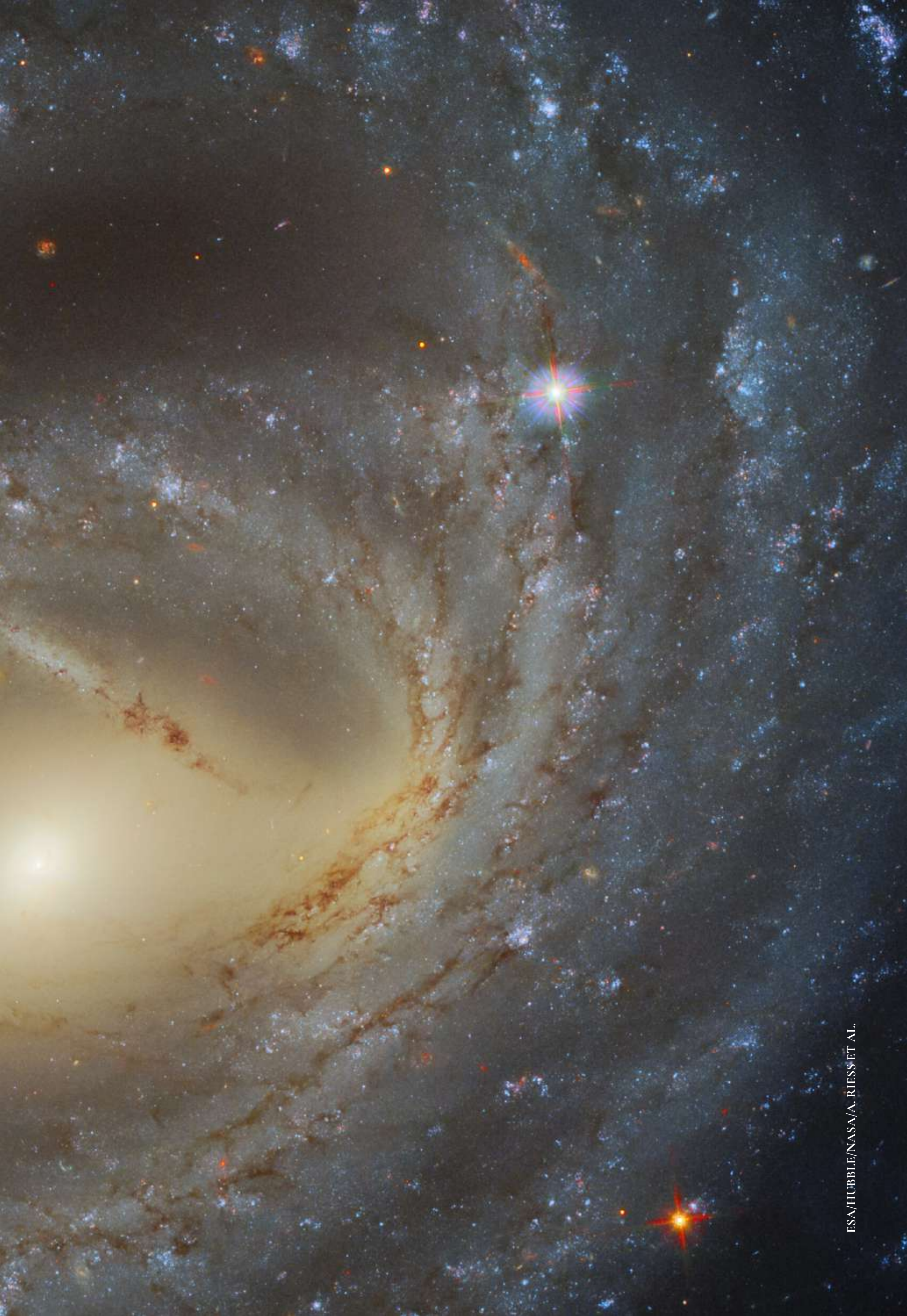
ART WOLFE

¿CÓMO SE COLOREAN LAS IMÁGENES ASTRONÓMICAS?

Una galaxia en cuatro filtros

Esta toma del telescopio espacial Hubble muestra la galaxia espiral NGC 7329. Los colores son espectaculares; sin embargo, las imágenes en bruto del Hubble son monocromáticas. ¿Cómo es posible?

Las coloraciones de las imágenes astronómicas se consiguen combinando observaciones con distintos filtros. Esta fotografía ha sido procesada a partir de observaciones con cuatro filtros, cada uno de los cuales abarca una región concreta del espectro, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo pasando por el óptico. Después, un equipo de técnicos y artistas juzga con el mejor criterio posible a qué colores visibles debería corresponder cada filtro y tiñe las imágenes en consecuencia. Por último, las secciones correspondientes a cada color se superponen. Los colores siempre se escogen de modo que sean tan representativos de la realidad como sea posible.


ESA/HUBBLE/NASA/A. RIESS ET AL.

CAMBIO CLIMÁTICO

TORMENTAS DE VAPOR

Jennifer A. Francis | El aumento de la temperatura y la humedad atmosférica está intensificando los huracanes y las lluvias torrenciales

ILUSTRACIONES DE MARK ROSS





El verano de 2021 nos brindó un flagrante ejemplo de la inestabilidad climática que cabe esperar en un mundo más cálido. A mediados de julio, las tormentas que azotaron el oeste de Alemania y Bélgica dejaron hasta 20 centímetros de precipitación en tan solo dos días. Las inundaciones se llevaron por delante algunos edificios y los arrastraron por las calles de las poblaciones. Una semana más tarde, en la provincia china de Henan, cayeron en tres días más de 60 centímetros, el equivalente a la precipitación total de un año, y centenares de miles de personas huyeron de los ríos desbordados. En la capital, Zhengzhou, los usuarios del metro publicaron vídeos en los que se veía a pasajeros atrapados en vagones inundados, estirando el cuello para alcanzar el último resquicio de aire que quedaba por encima del agua, cuyo nivel no dejaba de ascender. A mediados de agosto, un giro brusco en la corriente en chorro provocó tormentas torrenciales en Tennessee que dejaron unos asombrosos 43 centímetros en solo 24 horas, inundaciones que causaron la muerte de al menos 20 personas. Ninguno de esos sistemas tormentosos tenía la categoría de huracán o borrasca tropical.

Sin embargo, muy pronto el huracán Ida se arremolinó en el golfo de México, la novena tormenta tropical con nombre en la activa temporada que azotaba el Atlántico Norte. El 28 de agosto comenzó como una tormenta de categoría 1, con vientos sostenidos de 136 kilómetros por hora. Menos de 24 horas después, Ida alcanzó la categoría 4, con casi el doble de la velocidad que utiliza el Centro Nacional de Huracanes de EE.UU. para definir una tormenta que se intensifica rápidamente. Al golpear la costa de Luisiana con vientos de 240 kilómetros por hora, dejó a más de un millón de personas sin electricidad y a más de 600.000 sin agua durante días. La furia de Ida continuó hacia el noreste, donde dejó un récord de 8 centímetros de lluvia en una hora en la ciudad de Nueva York. La tormenta causó la muerte de al menos 80 personas y devastó toda una franja de poblaciones en el este de Estados Unidos.

Todos esos eventos destructivos tienen un denominador común: la presencia de un ingente volumen de vapor de agua. El vapor de agua desempeña una función fundamental tanto en la activación de tormentas con alto poder destructivo como en la aceleración del cambio climático. A medida que los océanos y la atmósfera se calientan, se incorpora al aire más agua procedente de la evaporación. El aire caliente, a su vez, puede retener más cantidad de vapor antes de que este se condense en gotas y forme nubes que pueden causar lluvias torrenciales. La cantidad de vapor atmosférico ha aumentado cerca de un 4 por ciento en todo el mundo desde mediados de la década de los noventa. Si bien no parece una cifra elevada, sí lo es para el sistema climático. Una atmósfera con más vapor supone un aporte adicional de energía y humedad para desencadenar tormentas de todo tipo, como las tormentas eléctricas estivales, los ciclones, los huracanes e incluso las tempestades de nieve. El vapor adicional permite una rápida intensificación de las tormentas tropicales como Ida, lo que concede poco tiempo a los responsables de seguridad para alertar a la población que se halla en el punto de mira.

Los científicos previeron hace tiempo que el cambio climático supondría una mayor presencia de vapor atmosférico, lo cual favorecería la

EN SÍNTESIS

El calentamiento global ha aumentado la cantidad de humedad contenida en la atmósfera. Desde finales del siglo pasado, el vapor de agua atmosférico ha crecido en un 4 por ciento, una cifra con importantes consecuencias para el clima.

Una mayor cantidad de vapor de agua implica tormentas cada vez más frecuentes y violentas. Y en las zonas con temperaturas elevadas, un aumento de la humedad atmosférica puede conllevar importantes riesgos para la salud humana.

El vapor de agua actúa además como un potente gas de efecto invernadero, por lo que opera como un amplificador del calentamiento global. Los modelos futuros deberán estudiar con más detalle sus efectos en el clima del planeta.

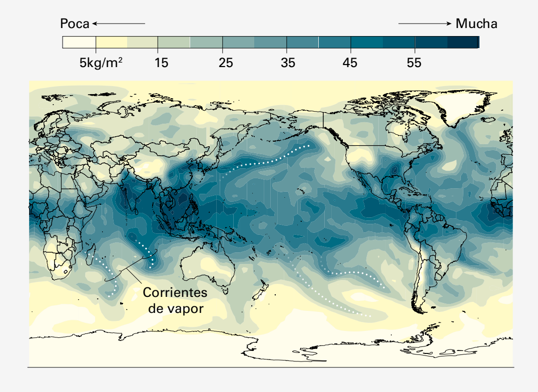
formación de lo que podrían denominarse «tormentas de vapor», que dejan caer más lluvia y nieve que las tormentas de hace solo unas décadas. Las observaciones confirman que los eventos con fuertes precipitaciones son cada vez más violentos y se producen con mayor frecuencia en todo el planeta. Desde finales de los ochenta, cerca de un tercio de los daños materiales causados por inundaciones en EE.UU. (73.000 millones de dólares) se atribuyeron al aumento de las precipitaciones.

Un mundo más húmedo

El vapor de agua atmosférico no se distribuye de manera uniforme en el planeta. Por lo general, es más abundante en la región ecuatorial y más escaso hacia los polos, pero las tormentas y los vientos pueden bombear corrientes de humedad tropical hacia las latitudes más altas. A medida que el planeta se calienta, la cantidad de vapor atmosférico aumenta por encima de los océanos, y más aún sobre las zonas terrestres.

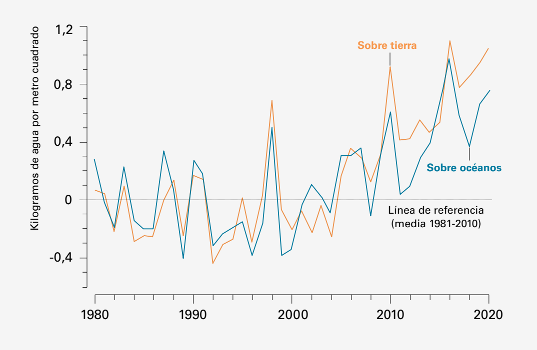
AGUA EN LA ATMÓSFERA EL 31 DE AGOSTO DE 2021

El color indica los kilogramos de agua en una columna vertical de atmósfera sobre un metro cuadrado de superficie terrestre si todo el vapor se condensara y cayera en forma de lluvia. En el sudeste de EE.UU. se aprecia la forma circular del huracán Ida, en color oscuro.



AUMENTO DEL VAPOR DE AGUA ATMOSFÉRICO

En los últimos años, la cantidad de vapor a escala mundial ha aumentado por encima de los océanos y los continentes en comparación con la media anual entre 1981 y 2010.



En agosto de 2017, por ejemplo, el huracán Harvey arrojó un insólito metro y medio de lluvia en algunos barrios de Houston durante los cinco días que permaneció en la región, lo que desconcertó incluso a los meteorólogos más expertos. Ocasionalmente, las bandas de precipitación arrojaron unos asombrosos 15 centímetros por hora. Según un estudio, las devastadoras lluvias fueron tres veces más probables y un 15 por ciento más intensas debido al cambio climático y, en particular, al aire cargado de humedad que alimentó a Harvey desde el golfo de México, inusualmente cálido.

A diferencia de casi todos los gases atmosféricos, el vapor de agua no se distribuye de forma uniforme por todo el planeta. Abunda particularmente en las regiones tropicales húmedas que flanquean el ecuador. Desde allí se extienden unas alargadas corrientes de vapor hacia los polos, más fríos y secos, que dejan episodios de intensas y prolongadas precipitaciones en las latitudes medias y altas. Tales ríos de calor y humedad equilibran la distribución energética de la atmósfera terrestre y generan intensas tormentas de vapor a lo largo de su trayectoria.

Bomba de energía

Cuando sudamos bajo un sol abrasador o ponemos a hervir una olla, el agua líquida se transforma en vapor de agua. El factor desencadenante es el calor. Del mismo modo, en el sistema climático, el agua contenida en el suelo húmedo, las plantas, los océanos, los lagos y los arroyos se evapora y se incorpora en el aire por acción del calor. El vapor contiene una forma de energía conocida como calor latente. Si el vapor se condensa de nuevo en un líquido (en forma de nube o de rocío sobre el césped), el calor latente se libera a la atmósfera. La bolsa de aire caliente resultante es más ligera que el aire circundante y, por tanto, asciende. Dado que las temperaturas suelen ser más frías a mayor altura, la bolsa puede continuar su ascenso al tiempo que aumenta de tamaño y se condensa en su interior más vapor de agua en forma de gotas, lo que libera aún más calor latente. Si atravesamos en avión una gran nube en forma de coliflor, sentiremos las turbulencias generadas por tales torres de aire ascendente.

El calor latente constituye el principal motor de los huracanes, las tormentas eléctricas y los episodios cotidianos de mal tiempo. La energía

FUENTES: LABORATORIO ERSL DE CIENCIAS FÍSICAS DE LA NOAA (*mapa base*); WEB-BASED REANALYSIS INTERCOMPARISON TOOL (LABORATORIO ERSL DE CIENCIAS FÍSICAS DE LA NOAA, OFICINA DEL PROGRAMA CLIMÁTICO DE LA NOAA Y OFICINA CIENTÍFICA DEL DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE EE.UU.) (*gráfico base*); «THE NCEP/NCAR REANALYSIS 40-YEAR PROJECT», E. KALNAY ET AL. EN *BULLETIN OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, VOL. 77, MARZO DE 1996 (*modelo de análisis de datos*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)



Un ciudadano de LaPlace, en Luisiana, camina a través de la inundación causada por el huracán Ida, que dejó 43 centímetros de lluvia.

LUKE SHARRETT BLOOMBERG/GETTY IMAGES

asociada al calor latente no es nada desdeñable; en un huracán típico, la cantidad de energía térmica liberada en un día equivale a más de 200 veces la energía eléctrica producida diariamente en todo el mundo. Un huracán puede liberar el equivalente a una bomba nuclear de 10 megatones cada 20 minutos aproximadamente.

La consecuencia más preocupante del aumento del vapor de agua atmosférico podría ser su capacidad para intensificar rápidamente las tormentas tropicales. En términos meteorológicos, se considera que una tormenta se ha intensificado rápidamente si la velocidad máxima del viento aumenta al menos 30 nudos (56 kilómetros por hora) en un periodo de 24 horas, o bien si la presión central de la tormenta disminuye al menos 42 milibares en 24 horas. En los últimos 40 años, la probabilidad de que alguna tormenta se intensifique rápidamente en un año determinado se ha quintuplicado. Solo en 2020 ocurrió en diez huracanes del Atlántico: Hanna, Laura, Sally, Teddy, Gamma, Delta, Épsilon, Zeta, Eta y Iota. En 2021, cinco de los seis huracanes del Atlántico que se formaron antes de mediados de septiembre experimentaron el mismo proceso, incluidos Ida y Nicholas. Los resultados de los últimos estudios coinciden con la física más elemental: las probabilidades de una intensificación rápida aumentan con el calentamiento de los océanos, puesto que conlleva una mayor evaporación de agua y una mayor liberación de calor latente a la atmósfera. Los océanos absorben alrededor del 90 por ciento del calor retenido por los gases con efecto invernadero emitidos por el ser humano, que eleva la temperatura del agua, tanto a niveles superficiales como profundos, y el agua caliente actúa como una potente batería que proporciona energía a las tormentas.

El aumento del vapor de agua no es la única consecuencia del cambio climático que repercute en las tormentas tropicales. La disminución de la cizalladura del viento (la diferencia de

velocidad o de dirección entre los vientos más cercanos al suelo y los que soplan en la atmósfera) también favorece el desarrollo de tormentas, dado que las torres de aire ascendente tienen menos posibilidades de desprenderse. También se están estudiando otras variables, como las variaciones en la cantidad de polvo y de contaminantes atmosféricos, así como las diferencias en el calentamiento atmosférico a menor y mayor altura, que influyen en la velocidad a la que ascienden las bolsas de aire caliente.

Desde hace más de dos décadas, las temperaturas de gran parte del Atlántico Norte tropical son inusualmente cálidas y traen consigo un exceso de evaporación que propulsa violentos huracanes. Las tormentas no tropicales también se alimentan del vapor y la energía adicionales, lo que conlleva unas precipitaciones más intensas e incluso nevadas más fuertes.

Calor letal

La amenaza que supone el aumento del vapor de agua no se limita a las tormentas. También es responsable de que las noches estivales sean insoportablemente calurosas, cada vez con más frecuencia y en más lugares.

Desde mediados de la década de los noventa, las temperaturas mínimas nocturnas estivales de las zonas terrestres han aumentado más deprisa que las máximas diurnas. Ello se debe a que el vapor de agua es un gas con efecto invernadero y, por tanto, un aumento de su concentración supone un mayor calentamiento: el calor que normalmente escaparía al espacio por la noche queda atrapado e impide que la superficie de la Tierra se enfríe. Y mientras que el dióxido de carbono se extiende por todo el planeta, con independencia del lugar donde se emita, el vapor tiende a quedarse en la zona donde se genera.

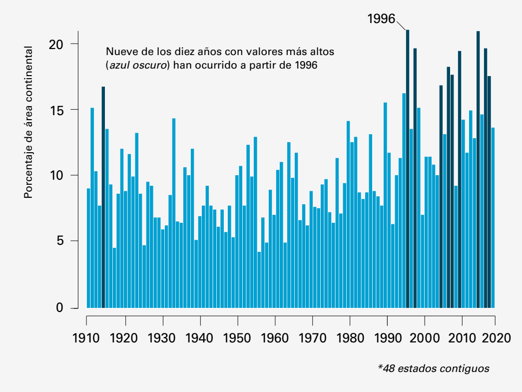
Por otro lado, una mayor cantidad de vapor también aumenta la peligrosidad de las noches calurosas. La mayor humedad nocturna impide que se evapore el sudor, el sistema de refrigeración natural del cuerpo, lo que causa un sobrecalentamiento de nuestro organismo y la alteración del sueño. Como medida del malestar suele emplearse el valor de la «sensación térmica», que combina los efectos de la temperatura y la humedad con el fin de representar el estrés que realmente siente el cuerpo. Una sensación térmica superior a unos 38 grados Celsius se considera peligrosa: la exposición prolongada puede ser letal, sobre todo para ancianos y niños. El calor también estresa al ganado y las mascotas, y los animales salvajes se adaptan migrando a latitudes más altas o a mayor altitud, si tienen la posibilidad de hacerlo. Sin un enfriamiento nocturno, el calor puede acumularse en el suelo y causar la muerte de algunas plantas e insectos, aunque también puede permitir la proliferación de especies que prefieren el calor. Según la *Declaración sobre el cambio climático y la salud 2021*, publicada por diversas organizaciones sanitarias, el calor nocturno también aumenta el riesgo de exposición a enfermedades transmitidas por insectos, lo que supone una amenaza para personas, animales y cultivos.

El peligro asociado al calor nocturno no solo aumenta en los países tropicales, ya calurosos, sino también en otros situados en latitudes más alejadas del ecuador. Las ciudades de la costa del golfo de EE.UU. ya han superado en más de una ocasión el umbral de peligrosidad. El calentamiento en Houston ha aumentado más de 2 grados Celsius desde 1970 debido a la proximidad de la ciudad al golfo de México y a su incesante desarrollo, que potencia el efecto de isla de calor. En julio de 2020, la sensación térmica en Houston superó los 43 grados Celsius, un valor más que insoportable.

Lluvias más intensas

Las lluvias y las nieves extremas se producen cada vez con mayor frecuencia debido a que el calentamiento del aire y los océanos genera más vapor en la atmósfera. Una tormenta «extrema» deja más precipitaciones en un solo evento que el 90 por ciento de las tormentas producidas en un año. En las últimas décadas, el fenómeno se ha multiplicado en numerosas zonas, tanto urbanas como rurales, y se convertirá cada vez más en la norma.

Porcentaje de área continental contigua estadounidense* donde las lluvias o las nieves extremas caídas en un solo día han contribuido mucho más de lo normal a las precipitaciones anuales.



FUENTE: ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS EN EE.UU. EN 2021 DE LA NOAA, TOMADOS DE LOS INDICADORES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EE.UU. DE LA AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL ESTADOUNIDENSE (*datos*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

Si los gases con efecto invernadero continúan acumulándose en la atmósfera, tales condiciones se darán pronto en numerosas ciudades del sur y de las latitudes medias. Antes del año 2000, la capital estadounidense experimentaba una media de una noche con una temperatura mínima por encima de los 27 grados cada cinco años. Desde comienzos de siglo, la media se ha situado en dos noches al año: diez veces más en tan solo 20 años.

Sin embargo, algunos países tropicales serán, o seguirán siendo, los más perjudicados. En mayo de 2015 se produjo una severa ola de calor, u «ola de vapor», que afectó a la India y a Pakistán. La sensación térmica diurna superó los 46 grados durante varios días y la elevada humedad impidió el enfriamiento nocturno. Más de 3500 personas sucumbieron ante las condiciones sofocantes. Si a ello se suma medio grado más de calentamiento global, el número de personas amenazadas por el calor extremo se duplica hasta alcanzar unos 500 millones en todo el mundo.

Amplificador del calentamiento

Por si las tormentas intensas y las noches asfixiantes no fueran lo bastante preocupantes, el vapor de agua también agrava el calentamiento global. Aunque el dióxido de carbono acapara casi todas las miradas, el vapor de agua constituye el gas con efecto invernadero más importante de la atmósfera. Absorbe mucha más energía infrarroja reflejada por la superficie terrestre que el resto de los gases, por lo que retiene más calor. Para ponerlo en perspectiva, una duplicación de la concentración de dióxido de carbono atmosférico, por sí sola, calentaría el planeta en torno a un grado Celsius. Sin embargo, los mecanismos de retroalimentación duplican ese calentamiento. De nuevo, aunque algunos mecanismos como la desaparición del hielo marino reciben gran atención, el mecanismo de retroalimentación del vapor de agua (el vapor derivado del calentamiento retiene calor, lo que conlleva un mayor calentamiento) es el más intenso del sistema climático.

Tal vez de forma contraintuitiva, la retroalimentación agua-vapor es más débil en las regiones con una mayor abundancia de vapor. En las zonas húmedas, la energía infrarroja absorbida por el vapor ya se encuentra cerca de su límite físico, por lo que un leve incremento de la humedad ejerce un efecto mínimo. En cambio, en las zonas secas, como las regiones polares y los desiertos, la cantidad de energía infrarroja absorbida se halla muy por debajo de su potencial máximo, por lo que cualquier vapor añadido retiene más calor y causa un aumento de las temperaturas en las capas más bajas de la atmósfera.

El incremento en el número y la duración de las olas de calor en el Ártico refleja la llegada de unos pulsos cada vez más frecuentes y duraderos de aire cálido y húmedo desde las latitudes inferiores; las mencionadas corrientes de vapor que se desprenden de los trópicos hacia el norte. En enero de 2021, por ejemplo, las temperaturas se elevaron 20 grados centígrados por encima de lo habitual en amplias zonas del Ártico. El aumento de las olas de calor en el Ártico, especialmente durante el invierno, retrasa la formación anual del hielo marino y contribuye a la desaparición de la cubierta de hielo.

El efecto del calor absorbido por el vapor adicional podría compensarse con un aumento en la formación de nubes, las cuales reflejan la radiación solar (lo que provoca un enfriamiento), aunque también retienen calor. Mientras que por encima de los océanos tiende a dominar el efecto de enfriamiento, en las latitudes altas prevalece el calentamiento. Los trabajos más recientes indican que, en promedio y a escala planetaria, domina el efecto de calentamiento, lo que establece un nuevo ciclo de retroalimentación asociado al vapor de agua.

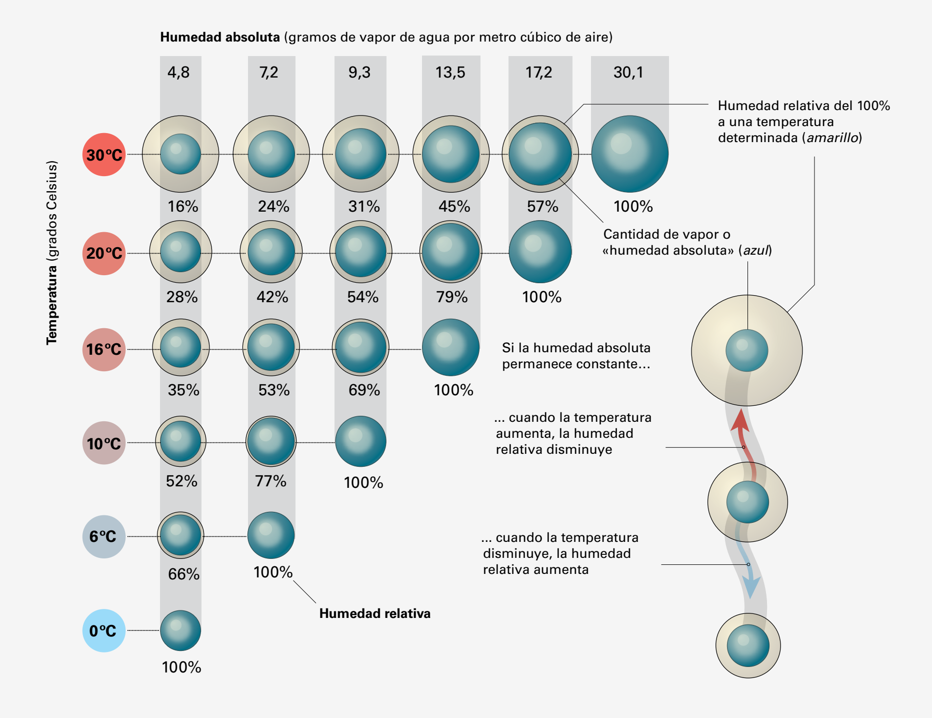
Mejores previsiones

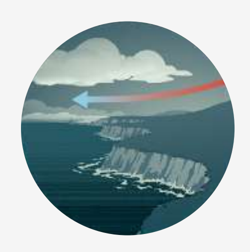
Mientras las actividades humanas sigan produciendo más gases que retengan el calor, los océanos y la atmósfera continuarán calentándose y se evaporará cada vez más agua, por lo que aumentará el número de tormentas y de fatigosas olas de vapor. Los huracanes de categorías superiores se desatarán también con más frecuencia, al igual que las tormentas que se intensifican rápidamente. La predicción de unos cambios tan bruscos constituirá un reto para los meteorólogos. Cuando las tormentas se intensifiquen antes de tocar tierra, como ocurrió en el caso del huracán Ida, las autoridades contarán con muy poco tiempo para dar la alarma, y la población apenas dispondrá de unas horas para evacuar.

La principal dificultad para predecir la formación de estas tormentas de gran envergadura reside en la escasez de datos de temperaturas submarinas. Las capas más profundas de agua caliente retienen mucha más energía que

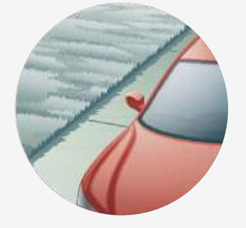
Humedad: una cuestión relativa

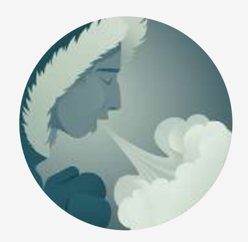
El hecho de que un día sintamos el aire pegajoso o seco depende de la humedad relativa. En el aire a cero grados Celsius, el vapor de agua puede alcanzar una concentración máxima de alrededor del 0,6 por ciento. A 30 grados, el aire puede contener mucho más vapor, hasta un 4,2 por ciento. Cuando el aire a una determinada temperatura contiene la máxima cantidad de vapor que puede retener, su humedad relativa es del 100 por cien.











Nubes: El vapor de agua es invisible a nuestros ojos, pero si se añade más cantidad al aire cuando la humedad relativa es del 100 por cien, se formará una nube. Las nubes representan el exceso de vapor que se condensa en pequeñas gotas de agua líquida que sí podemos ver. También se formará una nube si el aire con un 100 por cien de humedad relativa se enfría. Las nubes se originan en muy distintas circunstancias; por ejemplo, cuando una masa de aire frío con una humedad relativa inferior al 100 por cien sopla desde la tierra seca hacia el océano, donde la evaporación puede causar un aumento de la humedad relativa.

Niebla: La niebla es una nube que reposa sobre una superficie terrestre o acuática. Cuando una masa de aire cálido se mueve sobre un área más fría, el vapor se condensa y forma niebla. Cuando el aire caliente asciende hacia una zona fría de mayor elevación (como cuando sopla el viento por la ladera de una montaña) se pueden formar niebla o nubes. Y después de un día cálido, cuando el aire nocturno irradia energía infrarroja al espacio, su enfriamiento puede formar nieblas matutinas sobre campos y valles.

Rocío y escarcha: La pérdida de calor durante una noche clara y tranquila puede generar rocío o escarcha. Las superficies pierden calor infrarrojo con mayor rapidez que el aire, por lo que se enfrían a mayor velocidad. El vapor de agua atmosférico que entra en contacto con una superficie más fría puede condensarse en forma de gotas sobre la hierba, o congelarse formando cristales en el césped y en los parabrisas de los coches si la temperatura es lo suficientemente baja.

Respiración: Al exhalar, nuestro aliento añade vapor de agua al aire. Si exhalamos suficiente vapor hasta elevar la humedad relativa por encima del 100 por cien, se forma temporalmente una pequeña nube, que pronto se disipa a medida que las pequeñas gotas se evaporan. Debido a que el aire frío puede contener menos vapor, tendemos a ver nuestro aliento en los días más fríos.

JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*); NICK BOCKELMAN (*ilustraciones*)

las capas más someras, pero los satélites solo registran las temperaturas de la superficie oceánica. Los investigadores tratan de dilucidar cómo pueden determinar cuánta energía albergan los primeros cientos de metros de agua oceánica, que son los que realmente aprovechan las tormentas. En la actualidad, los expertos diseñan planeadores oceánicos autónomos que puedan recorrer la región superior del océano a diferentes profundidades para tomar datos de temperatura y salinidad. También trabajan con datos obtenidos por satélites que pueden detectar variaciones en la elevación de la superficie marina: las capas profundas de agua caliente se expanden respecto a las regiones circundantes y causan un abultamiento en la superficie oceánica visible desde el espacio.

El vapor añadido en la atmósfera permite la rápida intensificación de las tormentas tropicales, lo que concede poco tiempo a las autoridades para alertar a la población

Pese a lo valioso de los datos procedentes de los satélites, también se requieren instrumentos que determinen la temperatura, la cantidad de vapor y las características de los vientos por todo el océano. Se seguirán empleando aviones «cazahuracanes», que atraviesan las tormentas y dejan caer instrumentos tanto en su interior como en sus alrededores. Los investigadores introducen los datos obtenidos en modelos informáticos que pueden proporcionar detalles sobre el estado de la atmósfera y la intensidad de las tormentas. La mayor cobertura de datos, sumada a unos ordenadores más rápidos y un conocimiento más amplio de los procesos de formación de las tormentas, permitirá mejorar las predicciones.

El vapor procede de distintas fuentes e influye en numerosos procesos atmosféricos. Los científicos aún tratan de comprender algunas de las interacciones, y los modelos informáticos siguen teniendo dificultades para predecir la influencia del vapor de agua en el cambiante sistema climático. Incluso la velocidad a la que se evapora el agua de un océano o un lago, un parámetro aparentemente sencillo, depende de múltiples factores, como la diferencia entre la temperatura del agua y la del aire situado encima, la cantidad de vapor contenido en el aire y la velocidad del viento. En el dominio terrestre el cálculo presenta todavía una mayor complejidad, ya que influyen variables adicionales como el grado de humedad del suelo y el tipo de vegetación. Predecir qué ocurrirá con el vapor una vez introducido en la atmósfera supone otro desafío. ¿Se condensará en nubes que generarán una tormenta y caerá en forma de lluvia o nieve? ¿Se condensará en la superficie en forma de rocío o escarcha? ¿Se desplazará cientos, o miles, de kilómetros desde los trópicos hasta las latitudes más altas? Los errores en cualquiera de los cálculos repercutirán en las predicciones de los futuros cambios de temperatura y los regímenes meteorológicos.

Debe prestarse una mayor atención al aumento del vapor de agua. Por desgracia, no podemos controlar de forma directa la cantidad presente en la atmósfera. Sin embargo, podemos reducirlo de forma indirecta frenando el calentamiento asociado a nuestras emisiones de dióxido de carbono y de metano, así como a la tala de árboles, que absorben el carbono atmosférico. Al reducir el calentamiento, podemos disminuir el aumento de vapor. Si lo logramos, podremos mitigar la futura intensificación de las tormentas de vapor y los estragos que puedan causar.

Jennifer A. Francis es científica principal y directiva del Centro Woodwell de Investigación Climática. Ha realizado numerosas investigaciones sobre calentamiento en el Ártico, vapor atmosférico y energía.



EN NUESTRO ARCHIVO

El enigma de las nubes. Kate Marvel en *IyC*, febrero de 2018.
Colapso ártico. Jennifer A. Francis en *IyC*, junio de 2018.
El amplificador meteorológico. Michael E. Mann en *IyC*, mayo de 2019.

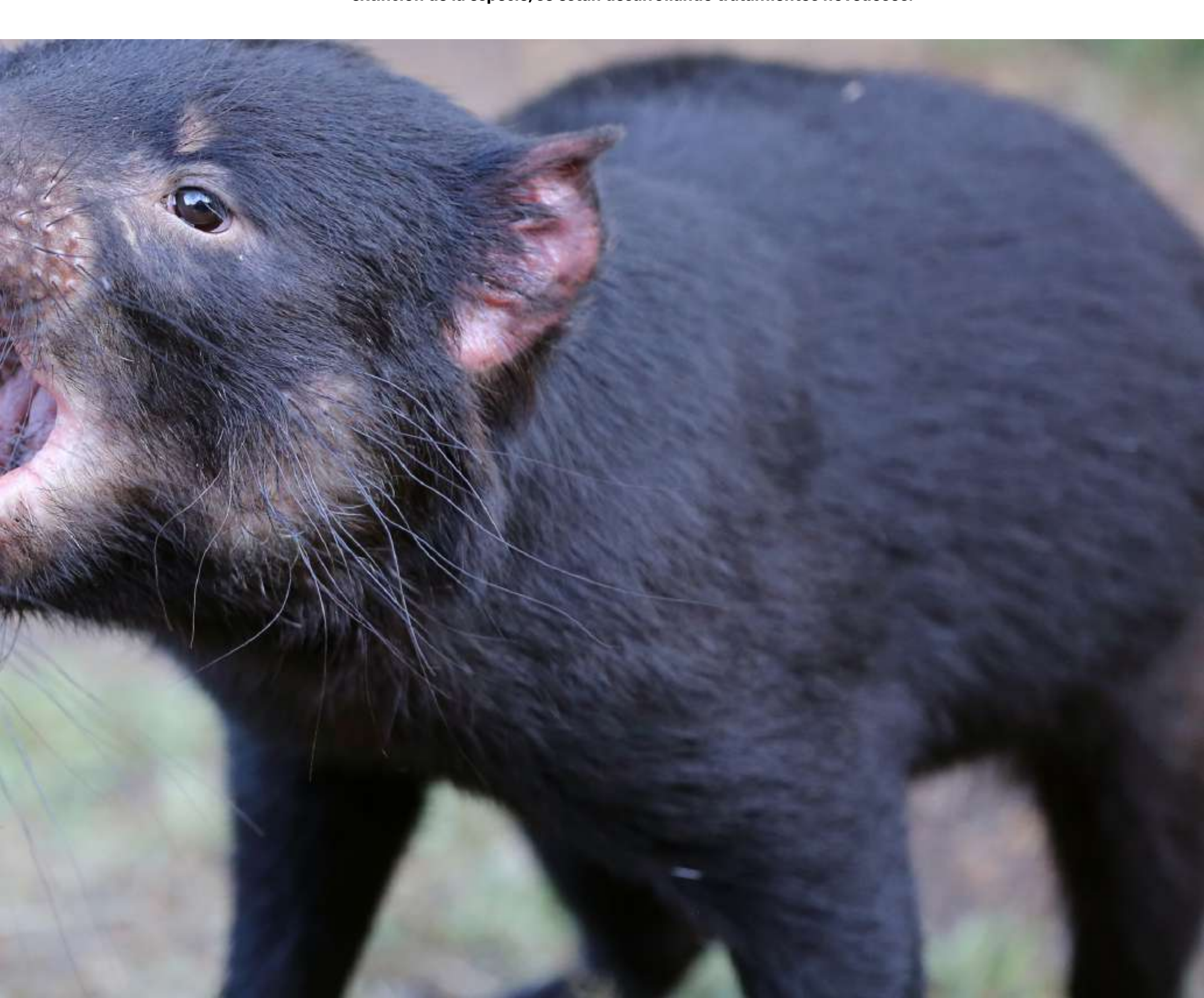
CONSERVACIÓN

NUEVOS TRATAMIENTOS PARA EL CÁNCER DEL DIABLO DE TASMANIA

Maria P. Ikonomopoulou y **Manuel A. Fernández-Rojo** | La terapia génica y las inmunoterapias, así como ciertos compuestos de venenos animales, ofrecen una gran esperanza para salvar la especie



El cáncer que está diezmando las poblaciones del demonio de Tasmania se transmite con las mordeduras que se hacen los animales cuando luchan. En la carrera contrarreloj para evitar la extinción de la especie, se están desarrollando tratamientos novedosos.



El demonio, o diablo, de Tasmania (*Sarcophilus harrisii*) es el marsupial carnívoro vivo más grande, además de ser una especie endémica de Tasmania y un icono de Australia. Desde hace más de veinte años, un cáncer facial transmisible ha devastado su población, que se ha reducido en más de un 80 por ciento.

El tumor, que se originó a partir de las células de Schwann (un tipo de neuronas), se detectó por primera vez en un animal del noreste de Tasmania en 1996 y, desde entonces, esa cepa de células cancerosas se ha extendido por los demonios de toda la isla. En 2014 apareció en el sureste una segunda cepa genéticamente distinta. En la actualidad, con una población menor de 15.000 individuos, el demonio figura en la lista de las especies en peligro de extinción de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de la Organización de las Naciones Unidas. También está protegido por la legislación estatal de Tasmania y la federal australiana.

En la actualidad, para controlar la enfermedad y garantizar la conservación de la especie se están aplicando principalmente estrategias de prevención y protección. Una de ellas es el establecimiento de poblaciones cautivas en regiones específicas del estado de Tasmania, en el continente australiano y en zoológicos de alrededor del mundo, como el de San Diego, en California. Además, dentro del programa Save the Tasmanian Devil, del Gobierno de Tasmania, se están liberando a la naturaleza demonios sanos criados en cautividad. También existen programas para detectar el cáncer de forma temprana, favorecer la reproducción de la especie y ampliar las zonas de su hábitat en las que aún no ha llegado la enfermedad.

Sin embargo, todavía no hay disponible ningún tratamiento veterinario que ayude a los animales a combatir este cáncer. La falta de herramientas moleculares para comprender los mecanismos celulares subyacentes a la enfermedad ha impedido la generación de terapias. Afortunadamente, en los últimos años este contexto ha comenzado a cambiar y están surgiendo varios posibles tratamientos, algunos de ellos avanzados por nuestros grupos de investigación.

Inmunoterapias en animales

Al contrario que la mayoría de los tumores, el que aqueja al diablo se caracteriza por ser contagioso. En el reino animal, solo se conocen otros tres tipos de tumores transmisibles: el cáncer venéreo canino, el cáncer similar a la leucemia en los bivalvos marinos y el sarcoma contagioso de células del retículo en los hámsteres sirios. En los humanos, el cáncer de cuello uterino por papilomavirus podría constituir la enfermedad más parecida en este sentido.

Sin embargo, a diferencia de estos tumores, el del demonio de Tasmania crece como un aloinjerto que se transmite de un animal a otro cuando estos se muerden durante las disputas territoriales o de apareamiento. El cáncer se manifiesta primero en la cara, en la que aparecen grandes bultos alrededor de los ojos y la boca. Estos impiden que los demonios se alimenten y, como consecuencia, terminan por morir de hambre. O bien, si sobreviven seis meses, el cáncer, que es muy agresivo, se propaga a los órganos principales, donde crea tumores secundarios (metástasis), y consume la vida de los animales.

La endogamia sistémica entre los demonios ha llevado a una baja diversidad genética de sus poblaciones. Como consecuencia de la semejanza genética entre todos los individuos, su sistema inmunitario es incapaz de reconocer y eliminar las células cancerosas que proceden de otros demonios. El resultado es una continua expansión de la enfermedad.

Teniendo en cuenta esa fragilidad inmunitaria, una de las estrategias que se están desarrollando para controlar el cáncer de los de-



El cáncer del demonio forma grandes bultos alrededor de los ojos y la boca que impiden la alimentación.

PÁGINAS PRECEDENTES: ISTOCK; WIKIPEDIA (*tumores faciales*)

monios son las inmunoterapias. Estas se basan en las que ya se han empleado con cierto éxito en algunos cánceres humanos. Consisten en modificar genéticamente células del tumor del demonio para que expresen antígenos que refuercen la respuesta inmunitaria de los animales enfermos. De hecho, se espera que la irrupción de las nuevas técnicas de edición genética, como CRISPR/Cas9, puedan potenciar esta estrategia. Por otro lado, se están dedicando esfuerzos a desarrollar vacunas. De las dos vacunas candidatas basadas en anticuerpos, solo una ha arrojado resultados un poco prometedores al lograr reducir, aunque no evitar, la progresión del crecimiento tumoral. Y, por último, hay estudios que señalan la molécula inmunomoduladora imiquimod como un fármaco prometedor, ya que logra eliminar las células cancerosas del demonio sin dañar las sanas.

Fármacos antitumorales

Otra de las posibilidades que se están explorando es el empleo de medicamentos antitumorales ya aprobados para uso humano. Recientemente, se ha comenzado a experimentar con algunos autorizados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA). Las pruebas con fármacos como la vincristina, el carboplatino y la doxorrubicina no han logrado detener las células cancerosas del demonio. Sin embargo, el cribado de alto rendimiento ha descubierto algunos compuestos de interés. Se trata de los inhibidores de las cinasas que fosforilan las tirosinas en posiciones especificas dentro de la secuencia de aminoácidos de las proteínas con capacidad oncogénica. Dichos fármacos evitan la fosforilación y la activación de estas proteínas responsables de las vías de señalización que promueven el crecimiento celular incontrolado que caracteriza al cáncer. Despiertan especial interés los inhibidores de la fosforilación del receptor ERBB, una proteína situada en la membrana celular.

Por otro lado, algunos grupos, entre ellos el nuestro, están investigando la posibilidad de administrar estatinas para inhibir el metabolismo energético derivado de los carbohidratos y la síntesis de colesterol en las células cancerosas. Estos estudios han demostrado que una reducción parcial del contenido de colesterol celular mediante la activación del sensor de colesterol LXR (receptor de hígado X) promueve el crecimiento de las células cancerosas. Sin embargo, la inhibición total de la síntesis de colesterol en respuesta a la atorvastatina (una estatina) redujo el crecimiento de los tumores del demonio en modelos preclínicos desarrollados en ratones. A nivel celular, la atorvastatina redujo la glucólisis (metabolismo de la glucosa y otros azúcares), responsable de producir la energía que necesita el tumor para mantener el crecimiento celular. Además, se observó que la atorvastatina no afectaba a los órganos y tejidos principales de los ratones, lo que respalda la idoneidad de la atorvastatina para tratar el cáncer de los demonios sin dañar su salud.

Por último, también han surgido nuevas terapias potenciales basadas en venenos de animales. Nuestros grupos están investigando una de ellas: la gomesina. Se trata de un péptido derivado de venenos de araña cuyos análogos han mostrado actividades citotóxicas contra las células del cáncer del demonio. Estas sustancias detienen su proliferación al estimular la expresión de genes reguladores negativos del ciclo celular (*p53*, *p27* y *p21*), lo que da lugar a la generación de especies reactivas de oxígeno, que causan estrés celular y finalmente inducen necrosis (muerte) de las células tumorales.

Las terapias derivadas de venenos de animales están aún lejos de su aplicación. Sin embargo, los nuevos conocimientos sobre los mecanismos moleculares de las estatinas y los inhibidores de ERBB en las células cancerosas de los demonios, junto al hecho de que son compuestos aprobados por la FDA, justifican futuras investigaciones clínicas. En ellas deben cooperar las autoridades y los veterinarios de fauna salvaje de Tasmania para determinar su administración e implementación inmediata, así como para realizar la monitorización de los demonios. Estas terapias podrían usarse junto con estrategias actuales de gestión y protección de las poblaciones de demonios. Albergamos la esperanza de que estos enfoques multidisciplinarios ayuden, en última instancia, a la conservación de la especie.

Maria P. Ikonomopoulou es directora del Laboratorio de Venómica Translacional en el Instituto IMDEA Alimentación en Madrid.



Manuel A. Fernández-Rojo dirige el Laboratorio de Medicina Hepática Regenerativa en el mismo instituto. Ambos son profesores asociados honoríficos de la Universidad de Queensland.



EN NUESTRO ARCHIVO

El cáncer del diablo. Menna E. Jones y Hamish McCallum en *IyC*, agosto de 2011.

EL PODER DE LA AGROECOLOGÍA

Raj Patel | Agricultores de todo el mundo cultivan y comparten alimentos siguiendo métodos que mejoran la nutrición, la calidad de vida y la biodiversidad

FOTOGRAFÍAS DE THOKO CHIKONDI



Aldeanos de Bwabwa, en el norte de Malaui, comparten semillas y consejos sobre los cultivos y colaboran en las labores de recolección y de acarreo de la cosecha a casa.

Aunque es la punta de lanza de la batalla contra el hambre, se nos podría perdonar que creyéramos estar viendo un *reality* culinario en la televisión. En una aldea malauí enclavada a los pies del monte Bwabwa y a orillas de un afluente del Rukuru, un centenar de personas se reúnen en torno a cacerolas y fogones. Los niños se agolpan alrededor de un gran mortero y se ríen con disimulo de los torpes intentos de sus padres, tíos y vecinos por convertir los granos de soja en una bebida. En otro puesto un hombre muestra a un anciano de la aldea que le dobla en edad las virtudes de las rosquillas de boniato. En un tercero, una mujer enseña a un vecino a preparar unas nutritivas gachas con sorgo. La supervisora de todo esto es la organizadora comunitaria Anita Chitaya, dotada de las habilidades de un chef, la energía de una animadora infantil y la determinación de un sargento. Después de ayudar a un grupo a cocinar un bizcocho de mijo, pasa a aconsejar a unos niños, que jamás comerían judías por gusto, cómo convertir con sus manos inquietas un puré de soja y alubias rojas en hamburguesas.

Reina una atmósfera de competencia lúdica. De hecho, es eso, una competición. Al final de la tarde se comparte la comida y se premia la más sabrosa (las rosquillas ganan por goleada) y la que tiene más posibilidades de acabar en el plato diario de la gente (ganan las gachas porque, aunque a casi todos les gusta la comida frita, las rosquillas son laboriosas y el aceite muy caro).

Es el Día de las Recetas en Bwabwa, una aldea del norte de Malaui habitada por unas 800 personas. Estas celebraciones son experimentos sociológicos destinados a reducir la desigualdad doméstica que forman parte de un enfoque multifacético, llamado agroecología, con el que se pretende erradicar el hambre. Según los académicos se trata de una ciencia, una práctica y un movimiento social. La agroecología aplica la ecología y las ciencias sociales a la creación y la gestión de sistemas alimentarios sostenibles y se basa en una decena larga de principios conexos, que van desde la conservación del suelo y de la biodiversidad hasta el fomento de la equidad de género e intergeneracional. Más de ocho millones de colectivos de agricultores en todo el mundo están probándola y han descubierto que, en contraste con las prácticas convencionales, retiene más carbono en el suelo, consume agua con moderación, reduce la dependencia de los insumos externos gracias al reciclaje de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, y fomenta, en lugar de devastar, la biodiversidad, tanto en el suelo como en los campos. En todos los continentes, la investigación ha demostrado que los agricultores que la aplican consiguen mayor seguridad alimentaria, mayores ingresos, mejor salud y un menor endeudamiento.

Chitaya me contó que, en la entrada del nuevo milenio, cuando los agricultores de Bwabwa seguían fieles a las prácticas convencionales, «a veces no probábamos bocado en varios días. Mi primer hijo sufrió desnutrición». Ahora su primogénito, France, es un adolescente sano que le ayuda a enseñar rudimentos de cocina a otros chicos. La clínica pediátrica dedicada a la desnutrición que se fundó cerca de la aldea ha tenido que cerrar por falta de pacientes, aunque en todo Malaui más de un tercio de los menores de cinco años sufren retraso en el crecimiento por carencias alimentarias. A pesar de la pandemia de COVID-19, cuyos devastadores efectos económicos han agravado la desnutrición en el mundo, la agroecología continúa ayudando a Bwabwa a escapar del hambre.

EN SÍNTESIS

La agroecología aplica la ecología y las ciencias sociales a la creación de sistemas alimentarios sostenibles que refuerzan la seguridad alimentaria, reportan más ingresos, mejoran la salud y reducen la dependencia de los aportes externos del pequeño agricultor.

El policultivo, la siembra de variedades adaptadas a las condiciones locales y el uso de las leguminosas como fertilizantes destacan como prácticas que garantizan la productividad y dotan de resiliencia a los cultivos, al tiempo que conservan y mejoran el suelo.

En su vertiente social, la agroecología aboga por la equidad de género e intergeneracional, objetivos que pasan por acabar con la supeditación de la mujer al hombre y por dotarla de mayor autonomía a través de las labores agrícolas, con un reparto más equitativo de las tareas domésticas.



En Bwabwa, el agua de boca y la destinada a cocinar se extrae de un pozo comunitario, pero el cambio climático está provocando que los niveles freáticos desciendan en la región, lo que obliga con frecuencia a largas caminatas para abastecerse de ella.

Sin embargo, cuando los responsables políticos asistieron a la Cumbre de Sistemas Alimentarios de las Naciones Unidas, a principios del otoño de 2021, ninguna de las soluciones propuestas para luchar contra el hambre incluía a la agroecología. Entre los patrocinadores de la cumbre se hallaba la Fundación Gates, cuya solución preferida consistía en un conjunto de tecnologías basadas en la revolución verde. A pesar de la gran cantidad de pruebas que demuestran que la Alianza para una Revolución Verde en África de esa fundación ha fracasado, uno de sus principales seguidores en Ruanda presidió la citada cumbre. Los defensores de la agroecología, como la Alianza para la Soberanía Alimentaria en África, que representa a 200 millones de productores y consumidores de alimentos, poseen muy pocos recursos para influir en un proceso que silencia cada vez más sus voces.

Para acabar con el hambre no bastará con sacar más alimentos del suelo; habrá que enfrentarse a las arraigadas jerarquías de poder. Durante la última década la producción de alimentos ha superado, por regla general, a la demanda; hay disponible más cantidad de alimentos por persona que nunca antes. Pero debido a las desigualdades globales y regionales, exacerbadas por la pandemia, la hambruna es más acuciante que en 2010. En otras palabras, hay más alimentos, pero también más hambre. Muchas personas se ven privadas de sustento no porque escasee, sino porque no pueden acceder a él.

El sistema alimentario mundial se estableció originalmente bajo el dominio del colonialismo, cuando la agricultura y los modelos de propiedad de la tierra de una gran parte de los trópicos se reconfiguraron y decenas de millones de trabajadores esclavizados y en régimen de servidumbre fueron enviados a otras partes del mundo para abastecer a los europeos de azúcar de caña y otros cultivos tropicales. Lejos de acabar con el fin del colonialismo, este sistema de extracción de alimentos se ha consolidado debido a las condiciones impuestas por los préstamos concedidos por instituciones internacionales como el Banco Mundial o el Fondo Monetario Internacional (FMI). Para pagar sus deudas, África exporta de todo, desde rosas hasta caldo.

La agroecología libera a los agricultores más pobres del mundo de tales estructuras de control y da más poder a las personas como Chitaya, una de las miles de millones que conforman la base de la pirámide socioeconómica. No sorprende, pues, que sea impopular entre las empresas agrícolas convencionales, los gobiernos del hemisferio norte y los organizadores de la cumbre sobre sistemas alimentarios. El hecho de que reconozca que los problemas sistémicos requieren soluciones sistémicas convierte a la agroecología en una amenaza.

El hambre en Malaui

Toda mi vida he intentado averiguar por qué hay gente que pasa hambre y qué se podría hacer para remediarlo. He viajado con organizaciones como Naciones Unidas y el Banco Mundial y he escuchado a aquellos que discrepan, tanto de dentro como de fuera de la Organización Mundial del Comercio. Sin embargo, en la última década, también he aprendido de los agricultores pobres.

En 2011 visité por primera vez Bwabwa, invitado por mi amiga de la escuela de posgrado, Rachel Bezner Kerr, hoy profesora de estudios del desarrollo en la Universidad de Cornell. Cuando ella llegó hace una década, Malaui es-





Experimentar con recetas y cultivos que no les son familiares ha ayudado a los aldeanos de Bwabwa a mejorar y diversificar la alimentación (*arriba*). Lo mismo ha ocurrido con la equidad de género, que alivia la carga que recae en la mujer. Winston Zgambo ayuda a Anita Chitaya a preparar rosquillas con harina de judías (*derecha*). Su marido, Christopher Nyoni, también cocina, aunque esta ha sido una labor tradicionalmente femenina (*página siguiente*).

taba inmerso en una gran crisis económica. El Gobierno había reducido de un día para otro las subvenciones a los fertilizantes, mientras la pandemia de VIH y sida estaba causando estragos humanos y económicos. Los agricultores, la mayoría practicantes de una agricultura industrial que exigía productos químicos caros, estaban desesperados. Bezner Kerr quería ser útil mientras elaboraba un proyecto para su máster, por lo que buscó a las familias más desfavorecidas con la intención de que la ayudasen en su investigación. Tuvo la suerte de conocer a Esther Lupafya, una enfermera que dirigía el programa de salud maternoinfantil en un dispensario de la pequeña ciudad de Ekwendeni. Juntas encontraron a los agricultores, Chitaya entre ellos, que estaban dispuestos a probar un tipo de agricultura diferente que los liberase de la dependencia de la agroindustria mundial y de sus aliados.

Seis largas horas de trayecto en coche separan la capital, Lilongüe, de Bwabwa, situada al norte. Salpicada de carteles que anuncian los proyectos de varias organizaciones no gubernamentales e instituciones de ayuda extranjeras, la carretera que parte del aeropuerto de la capital sigue la orilla oriental del Malaui, el tercer lago más extenso de África. Después de atravesar la ciudad más poblada del país, Mzuzu, con su edificio del banco nacional de seis pisos de altura, y Ekwendeni, más pequeña, hay que tomar varios caminos de tierra para llegar a Bwabwa. Los grandes campos llanos de regadío que flanquean la carretera principal son monocultivos de maíz, en cambio los campos cercanos al pueblo son más áridos, menos extensos, están inclinados en todas direcciones y abundan en ellos las matas de varios cultivos, según las necesidades de la familia a cargo y de las condiciones concretas de cada parcela.

El norte de Malaui no siempre tuvo este aspecto. El primer hombre blanco que lo visitó fue el misionero escocés David Livingstone, en 1858. Su campaña misionera condujo a la creación del Protectorado Británico de África Central, que más adelante pasaría a llamarse Nyasalandia. En las fotografías de la época se contempla una tierra cubierta de matorrales. El agricultor británico B. E. Lilley declaró a raíz de una visita al país en la década de 1920: «No ha llegado el día en que al nativo se le pueda juzgar a la altura del





hombre blanco en la labor de arrancar el fruto a la tierra». En la actualidad todavía persisten actitudes parecidas, expresadas, eso sí, en un lenguaje contemporáneo.

Ávidos de explotar los recursos de la colonia, los británicos comenzaron a exportar marfil y productos forestales, antes de pasar a los cultivos que acabarían transformando la tierra y la economía del país: té, algodón, azúcar y tabaco. Los colonizadores se apropiaron de las tierras, pero necesitaban mano de obra, por lo que impusieron un impuesto a la vivienda, en forma de una cuota familiar anual que se pagaba en efectivo. Al principio, las familias pagaban a los colonos vendiendo sus reservas de riqueza, generalmente ganado, hasta que no les quedó nada que vender. Luego enviaron a los hombres capaces a trabajar en las plantaciones y las minas situadas más al sur. La deuda convirtió a los agricultores y a los pastores autosuficientes en jornaleros con un salario mísero.

La deuda también convirtió a Malaui en un peón de sus acreedores. El país se independizó en 1964, para pasar los siguientes treinta años gobernado por el autócrata Hastings Banda. Los creditores occidentales recompensaron a su férreo régimen con préstamos para impulsar el desarrollo industrial mientras se ignoraba la creciente desnutrición. Esos créditos se convirtieron en los instrumentos del hambre, no solo en el país, sino en toda África. A principios del periodo poscolonial, entre 1966 y 1970, África era una exportadora neta de alimentos, pues llegó a vender 1,3 millones de toneladas al año. Pero la crisis del petróleo de la década de 1970 obligó a los gobiernos africanos a pedir aún más créditos al Banco Mundial y al FMI. Los conocidos como préstamos de ajuste estructural se concedieron con estrictas condiciones que, entre otras medidas, obligaron a recortar el gasto público en educación y sanidad y a privatizar los activos nacionales. Además, los países prestatarios recibieron instrucciones para que se concentrasen en las exportaciones de los cultivos de la época colonial, que les aportarían las divisas con que saldar sus deudas.

Desembolsar una media de 100 millones de dólares cada año a sus acreedores durante la década de 1980 no le sirvió a Malaui para abandonar la lista de los más endeudados. Peor aún.

¿Qué es la agroecología?

La agroecología es una forma de producir alimentos que imita a la naturaleza mediante el aprovechamiento de la biodiversidad y el reciclaje de los recursos y los nutrientes con objeto de mejorar la productividad, controlar las plagas, eliminar los agroquímicos y enriquecer el suelo. También hace posible que las comunidades marginadas se abastezcan de alimentos de forma sostenible, garantiza su distribución equitativa, mejora la alimentación y fomenta distintas formas de equidad, como la de género o la intergeneracional. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha elaborado un decálogo que siguen las comunidades adeptas a la agroecología.

RECICLAJE

La agroecología recicla los recursos naturales y los nutrientes. Al igual que ocurre en la naturaleza, no genera desperdicios. Gracias a los ciclos recurrentes, el nitrógeno atmosférico entra y sale del suelo, el agua de la lluvia pasa de la arboleda al campo y de ahí retorna al aire, el estiércol animal sirve como fertilizante y los restos de las cosechas como, por ejemplo, la paja, se convierten en alimento para el ganado.

CULTURA Y TRADICIONES ALIMENTARIAS

La agricultura industrial y el comercio global han generado dietas desequilibradas en todo el mundo, de modo que hoy las enfermedades cardiovasculares y la diabetes son tan comunes como la inanición y la desnutrición. La agroecología permite que prosperen las culturas alimentarias locales, restaurando la relación directa entre la producción de alimentos y su consumo.

VALORES SOCIALES Y HUMANOS

La atención a la igualdad, la inclusión y la justicia aseguran que nadie pase hambre. Las mujeres, responsables en la mayoría de las culturas de alimentar a la familia, figuran ahora entre los impulsores fundamentales de los proyectos agroecológicos. Mientras que los sistemas industriales devalúan el trabajo agrícola, la producción de alimentos se convierte en una tarea agradable y compartida y en un vehículo que potencia los lazos con la naturaleza y la comunidad. La protección del medioambiente hará posible que las generaciones futuras hereden sistemas naturales intactos.



ECONOMÍA CIRCULAR Y SOLIDARIA

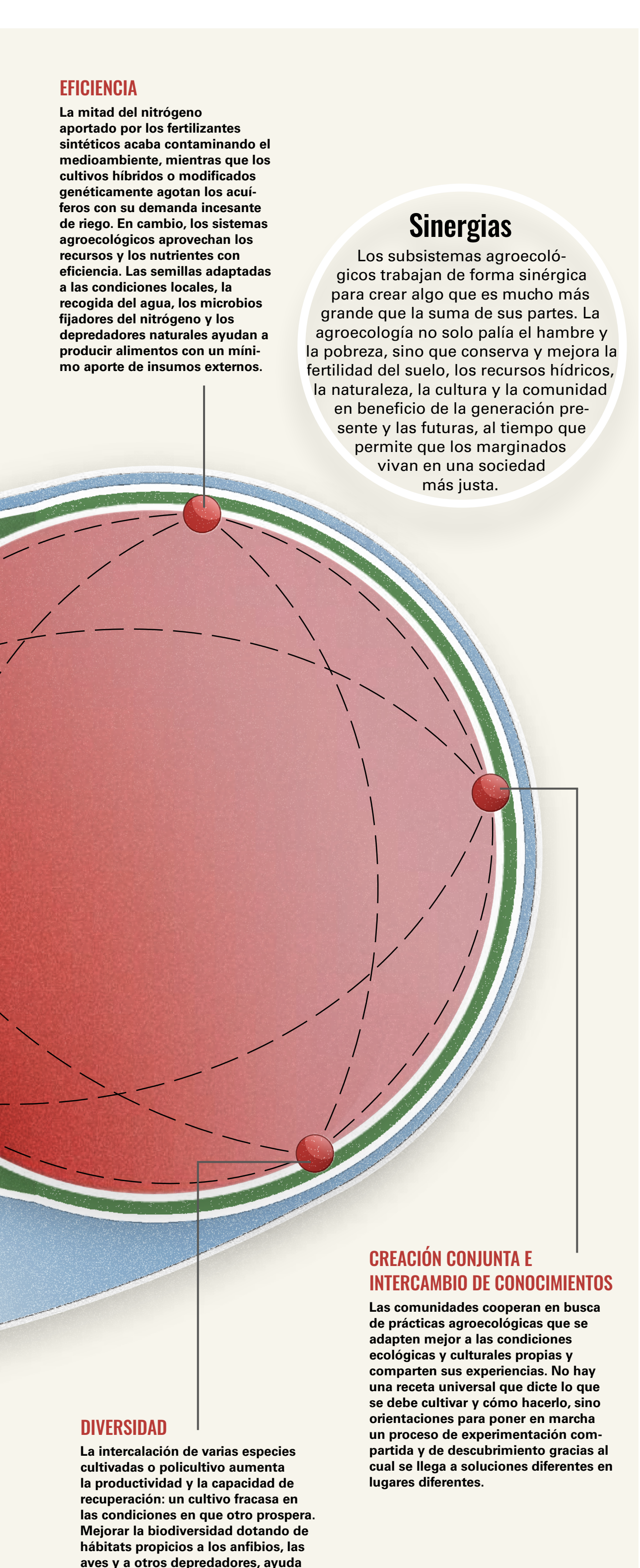
La agroecología pretende crear vínculos circulares entre los productores y los consumidores, por lo que la producción de alimentos está ligada directamente con la necesidad. Estas economías localizadas aumentan los ingresos de los productores, proporcionan a los consumidores productos frescos, fomentan los lazos comunitarios y reducen el desperdicio de comida y el consumo de energía en el transporte.

GOBERNANZA RESPONSABLE

Para que los sistemas agroecológicos prosperen es fundamental implantar sistemas de gobernanza a escala global, nacional y local que protejan los derechos de las comunidades productoras de alimentos sobre la tierra, el agua limpia, la propiedad intelectual (como las semillas tradicionales y los conocimientos técnicos), entre otros recursos. Los sistemas vigentes de comercio y gobernanza no facilitan el bienestar de los pequeños agricultores, que se encuentran entre los colectivos más precarios y endeudados del mundo.

RESILIENCIA

La diversidad de cultivos asegura una recuperación más rápida tras los desastres meteorológicos y de otro tipo. Y el cultivar con los insumos locales procedentes del reciclaje amortigua las perturbaciones económicas venidas del exterior.



FUENTE: «LOS 10 ELEMENTOS DE LA AGROECOLOGÍA. GUÍA PARA LA TRANSICIÓN HACIA SISTEMAS ALIMENTARIOS Y AGRÍCOLAS SOSTENIBLES», ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO), 2019 (REFERENCIA). FEDERICA FRAGAPAN (*gráfico*)

Al dedicar las tierras más fértiles a los cultivos comerciales destinados a la exportación y no a los cultivos de subsistencia hizo que los ajustes estructurales convirtiesen África en importadora de una cuarta parte de los alimentos que necesitaba durante el decenio siguiente. Entre 2016 y 2018, el continente ya importaba de ultramar un 85 por ciento de los que necesitaba: una dependencia debilitante.

Ensayo, revisión e intercambio

Un estudio nacional reveló en 1992 que el 55 por ciento de los niños de Malaui no llegaba a la talla correspondiente a su edad, un claro indicador de desnutrición. El Gobierno intentó desafiar la austeridad impuesta por los bancos y los acreedores internacionales subvencionando los fertilizantes agrícolas, pero finalmente cedió a sus demandas y acabó priorizando el pago de los préstamos. Lupafya y Bezner Kerr empezaron a trabajar poco después de que se retirasen estas ayudas, creando el proyecto Suelos, Alimentos y Comunidades Saludables (SFHC, por sus siglas en inglés) en Ekwendeni en el año 2000. Desde los 30 agricultores iniciales el SFHC ha pasado a cooperar con más de 6.000 personas de 200 pueblos en el fomento de la agroecología.

Chitaya y otras mujeres emprendieron una serie de experimentos consistentes en intercalar la siembra de cacahuetes con la de otras legumbres locales. Este sistema basado en dos leguminosas permitió cosechar cacahuetes y judías para alimentar a sus familias y enterrar en el suelo los rastrojos, ricos en nitrógeno, donde a continuación plantaron maíz sin necesidad de recurrir a ningún fertilizante de síntesis. Algunos se aventuraron un poco más e intercalaron hortalizas. Entretanto, el SFHC diseñó un sistema de revisión por iguales, según el cual, los participantes se reunían periódicamente para debatir medidas encaminadas a mejorar la fertilidad del suelo. Hacía tiempo que las agricultoras intercambiaban semillas y conocimientos sobre el mijo africano (*Eleusine coracana*), un cereal que tolera la sequía y produce granos muy nutritivos con los que se cocinan unas sustanciosas gachas y se elabora cerveza agria. El SFHC formalizó esa tradición de evaluar y compartir conocimientos.

Con los ensayos del cultivo de leguminosas en una parcela «madre» enclavada en medio de varios pueblos, los agricultores pueden adoptar esos cultivos a pequeña escala según sus





Algunos alimentos nutritivos, como el guandú y las judías (*arriba*), no suelen ser los favoritos de los niños, pero enseñarles a cocinarlos ayuda a modelar sus gustos (*derecha*). Las rosquillas de harina de judías son siempre bienvenidas (*siguiente página*).

preferencias, condicionadas por el estado del suelo, las necesidades alimentarias y el tiempo que pueden dedicar a su cuidado. Gracias a las charlas y a fuerza de repetir durante años, los ensayos preliminares en que participaban unas docenas de hogares dieron paso a miles de agricultores. De todo este proceso resultó que la mejor combinación para fijar el nitrógeno era la de cacahuete con guandú (*Cajanus cajan*). A medida que el suelo iba mejorando, los agricultores, muchos de los cuales eran mujeres, prosperaron tanto que pudieron alimentar a sus familias y vender los nada desdeñables excedentes en el mercado local.

Aun así, cada agricultor, cada campo y cada estación son diferentes, por lo que los experimentos no acabaron ahí. Algunas mujeres probaron combinaciones incompatibles a primera vista, como la soja o el tomate, la primera de origen asiático y el segundo americano, con cultivos autóctonos como el mijo africano. (Este último se había descartado porque no era exportable, pero persistió porque las mujeres solían elaborar cerveza con él para ganar un dinero extra.) Los campos de Bwabwa se siembran con una mezcla de cultivos foráneos y autóctonos, seleccionados mediante el método de prueba y observación, con redes de agricultores que intercambian conocimientos e ideas y supervisan el trabajo de los demás.

Esa actitud abierta a la experimentación y a la adaptación explica por qué, en torno a marzo, es posible ver en la desalentadora tierra rojiza un policultivo que parece fuera de lugar. Del suelo brotan altas hileras de maíz sobre la que trepan las judías, mientras a sus pies uno puede contemplar el follaje oscuro en forma de abanico de la calabaza local, con sus flores. En la agricultura de Centroamérica esta práctica es conocida como las tres hermanas: maíz, judía y calabaza.

En Malaui, las variedades que se han adaptado al lugar funcionan de una forma parecida: el maíz o el mijo aportan el cereal amiláceo que constituye el alimento básico de cada comida. Los tallos del cereal sostienen las judías, que aportan proteínas y fijan el nitrógeno. En los nódulos de las raíces de las leguminosas (como la judía o el cacahuete) tiene lugar la simbiosis entre la planta y los rizobios. La planta suministra energía a estas bacterias y ellas a cambio




secuestran las moléculas de nitrógeno del aire y las convierten en amoníaco y aminoácidos para su anfitriona. Funciona bastante bien con los cereales, dado que necesitan nitrógeno orgánico. La calabaza, como otras plantas afines, proporcionan grandes hojas que sombrean a las malas hierbas, y sus flores atraen a los insectos benefactores que mantienen a raya las plagas. Como colofón, al final de la temporada se recolectan las calabazas.

Juntos estos cultivos producen más alimento por unidad de superficie que por separado. Está demostrado que los policultivos son más productivos que los monocultivos. Después de la cosecha, los rastrojos se reintegran al suelo para mejorar la fertilidad y proporcionar estructura al bioma edáfico.

A principio de la década de 2000, algunas de las mujeres más pobres empezaron a cosechar cereales, judías y hortalizas en abundancia, conforme mejoraba la fertilidad de los campos de Bwabwa. El interés por las nuevas técnicas se extendió. Pero a pesar de las mejoras ostensibles en la producción de alimentos, la desnutrición infantil seguía siendo desmesurada. Algunos agricultores del proyecto, entusiasmados al ver que se habían convertido en agrónomos, empezaron a preguntarse cómo abordar el problema de forma más directa. Como descubrirían más adelante, habían prosperado al liberarse de las estructuras de poder externas, pero aún no se habían librado de las internas.

La lucha contra el patriarcado

Gracias a su trabajo en la clínica pediátrica, Lupafya tenía una sospecha: uno de los culpables de la desnutrición era la tradición imperante. La investigación etnográfica emprendida en las aldeas donde se implantó el SFHC confirmó su presentimiento. Dentro de la familia patriarcal, la opinión de las suegras prevalece por encima de la de sus nueras. Cuando un consejo de crianza infundado, por ejemplo, que los niños lloran porque no se les dan alimentos sólidos, se propaga a través de estas redes, a las madres jóvenes se les aconseja que desteten a sus hijos a los dos meses. Este consejo contraviene los datos científicos irrefutables que indican que lo mejor para el bebé es la lactancia materna en exclusiva durante el primer semestre, seguida por la combi-

nación de leche materna con alimentos sólidos hasta los dos años.

Lupafya ideó una forma amistosa de solucionar la discrepancia. El SFHC preparó a mujeres y hombres de las aldeas como mediadores en las conversaciones tensas, sobre todo entre suegras y nueras. Gracias a las reuniones mensuales y al liderazgo de Lupafya y otras personas, la ciencia se difundió y la desinformación se desvaneció.

Lupafya también aprendió algo: «El cambio empieza con el rechazo», me dijo. Resuelta la disponibilidad de alimento y corregidas las prácticas de lactancia, los sociólogos, conocedores de primera mano de la problemática, reconocieron otro factor determinante de la desnutrición infantil y pusieron manos a la obra: la violencia doméstica y, de forma más amplia, el patriarcado. La autonomía de la mujer está ligada con la mejora de los indicadores de nutrición infantil. Los sociólogos comprobaron que la desigualdad de género hacía recaer en las madres las labores de cocina, limpieza y cuidado del huerto y de los animales, todo ello sumado a la crianza de los bebés. Si los hombres ayudasen en las tareas domésticas, la autonomía de las mujeres mejoraría. La pregunta era: ¿cómo conseguir que cocinaran?

Para saber cómo se materializó ese cambio de tanto calado he estado trabajando con el equipo del SFHC más de una década y he documentado la labor de Chitaya en una película que he titulado *The Ants & the Grasshopper.* Mi protagonista conoció a Lupafya durante una visita a la clínica pediátrica. Más mayor, Mamá Lupafya, como la conocen, había ayudado a Chitaya con su matrimonio conflictivo. Y esta, después de asistir a talleres organizados por el SFHC, encontró trabajo como una de sus preparadoras y, gracias a su empeño y tesón en el hogar, ha logrado una convivencia más igualitaria con su marido.

Hay momentos en que Christopher Nyoni se esfuerza por contribuir en casa. Sufre de ceguera nocturna, una posible secuela de la desnutrición que sufrió durante la infancia. Cuando oscurece no puede cocinar ni limpiar y necesita ayuda para deambular por la casa. Pero en cuanto amanece se le puede ver encorvado sobre el fogón, haciendo la colada o yendo a por agua, tareas todas ellas tradicionalmente femeninas. El hecho de que esté dispuesto a romper con la tradición patriarcal prueba el éxito de Chitaya: «No quiero que mi hijo se case de la forma en que yo lo hice», me confesó Christopher.

El camino para transformar esta y otras relaciones de género en Bwabwa pasaba por cambiar la cultura en torno a la comida. El primer paso para lograrlo fue la organización de visitas puerta a puerta. Los miembros del SFHC visitaban los hogares con un experto y se ofrecían a enseñar a los hombres a cocinar alimentos nuevos como la soja. Después de pasar una tarde entretenidos en torno a un fogón instándoles a poner más empeño, prometieron cambiar. No lo hicieron. Así que los agricultores del SFHC pensaron en otra alternativa.

Una preocupación constante de los protagonistas era el estigma social de ser vistos como afeminados por desempeñar una tarea propia de mujeres. «¿Qué ocurrirá si mis amigos me ven cocinar?», preguntó Winston Zgambo. Después de ofrecer las clases particulares, el equipo del SFHC organizó justo lo contrario: competiciones públicas para familias enteras. Los Días de las Recetas todos los hombres se dedicaban a cocinar y, además, se divertían. Al incorporar un elemento lúdico con premios y reconocimiento social para los ganadores, las mujeres facilitaron el cambio, no solo de la cultura culinaria, sino de las desigualdades en el hogar.

Los datos del SFHC hablan por sí mismos. La participación en el programa hizo que los niños pasaran de estar por debajo del peso medio para su edad a superar la media. Un estudio reciente demostró que el hecho de que las agricultoras enseñasen a otras madres a cultivar propició toda una serie de beneficios, desde más diversidad alimenticia para los niños hasta menores tasas de depresión materna y mayor participación de los padres en las tareas domésticas.

Un futuro fecundo

La agroecología implica cuidar no solo de las personas sino también de los ecosistemas de los que dependen. Con la agricultura química solo se siembran monocultivos. Los agricultores compran fertilizantes, plaguicidas, herbicidas y el acceso al agua y, si conviene, alquilan polinizadores para maximizar el rendimiento. Destinan los ingresos de la cosecha a pagar las facturas y las deudas. En la agroecología no se buscan métodos para exterminar las plagas, sino para alcanzar el equilibrio ecológico. Se acepta una pequeña pérdida del cultivo al tiempo que se dota de un hábitat a los depredadores y se introducen otras formas de control biológico para lograr un ecosistema mucho más robusto y resistente. En



La abundancia de comida, la camaradería, la igualdad, la resistencia y la alegría son algunos de los beneficios de la agroecología.

el norte de Malaui, la biodiversidad es una parte del éxito del SFHC, como lo es en todos los sistemas agroecológicos exitosos. Hay más insectos, anfibios, reptiles, peces, aves y mamíferos en estos parajes que en los empobrecidos desiertos de verdor que constituyen los monocultivos modernos.

En un mundo donde cada vez son más frecuentes las condiciones meteorológicas extremas, la diversidad agroecológica, tanto la social como la biológica, es una fuente de resiliencia. Cuando en septiembre de 2008 el huracán Ike asoló Cuba, dejó los campos llenos de árboles caídos y de escombros. En la provincia de Sancti Spíritus, los investigadores se dieron cuenta de que las granjas que practicaban la agricultura convencional, con vastas extensiones de monocultivo, tardaron seis meses en recuperarse de la devastación. En cambio, las que estaban más diversificadas, con plátanos altos, árboles frutales, cultivos perennes y una buena cobertura del suelo, fueron capaces de recuperar el 80 por ciento de la capacidad en solo dos meses. Cuando las copas altas de los árboles cayeron al suelo, las plantas pudieron recibir más luz, lo que hizo que su crecimiento se acelerara: la diversidad es como una especie de seguro botánico. Además, las familias que vivían en ellas pudieron salvar algunos árboles la mañana siguiente al temporal, mientras que los peones de las grandes explotaciones estaban lejos de los campos, donde trabajan con contratos de temporada.

La agroecología también posibilita la resiliencia económica. Los pequeños agricultores suelen recibir muy poco apoyo. En cambio, han de gestionar ellos mismos los flujos de efectivo de la explotación. La agricultura convencional recibe un gran flujo de efectivo en el momento de la cosecha, que puede ser suficiente o no para saldar las deudas y que, además, disminuye con el transcurso del año. Con la agroecología es posible diversificar los ingresos mediante cultivos que maduran en las épocas de vacas flacas. Por ejemplo, en México un colectivo de agricultores complementa los ingresos del maíz con cultivos contracíclicos de café y con la recolección de miel.

A falta de bancos crediticios, los agricultores han recurrido en ocasiones a crear economías circulares e intercambios mutuos. En multitud de lugares se han creado almacenes de grano que amortiguan los altibajos de las cosechas y palían el hambre. Hace unos años, en Bwabwa las mujeres crearon un crédito para ayudar a gestionar el flujo de dinero y diversificar las fuentes de ingresos, como por medio de la venta de los llamados «fogones contra el cambio climático», unos hornillos eficientes que consumen mucha menos leña que las lumbres u otros medios. Una docena de ellas reunieron sus recursos y se turnaron para ir pidiendo prestado el dinero y luego devolverlo. Pero el círculo de ahorro se desmoronó por la devaluación de la moneda nacional, el kwacha, en 2012.

La crisis de la COVID-19 ha empeorado la vida del agricultor. El alza del precio de los alimentos ha tensionado la economía y, dado que se desviaron recursos a las medidas extraordinarias de control para que las comunidades permaneciesen en casa a salvo, las cosas se han vuelto más difíciles para todos. Aun así, las aldeas asociadas al SFHC que practican la agroecología han resistido aparentemente mejor la pandemia que otras comunidades.

Alimentar al mundo

Lo que se está haciendo en Malaui y lo que hacen cientos de millones de agricultores que experimentan con nuevas prácticas agroecológicas reviste suma importancia para el planeta. La agroecología brinda la oportunidad de lograr lo que no han conseguido los gobiernos, las corporaciones y las organizaciones de cooperación: acabar con el hambre. Durante un tiempo fue fácil replicar: «todo eso es muy bonito, pero no alimentará al mundo». Pero las familias campesinas que la practican han visto mejorar los indicadores de ingresos y de nutrición. Desde Nepal a Holanda, cuando el código de prácticas igualitario traspasa el campo y llega al hogar y a las redes comunitarias de intercambio y cuidados, los agricultores partícipes gozan de mejor economía y salud.

Mucho menos imaginativas fueron las soluciones propuestas en la reunión de la ONU por el Foro Económico Mundial, que contaban con el apoyo de los sectores alimentario y químico. Tampoco fueron lo bastante lejos para remediar los daños ambientales y de otra índole cometidos por la agricultura industrial. Este método de cultivo supuestamente científico es uno de los mayores impulsores del cambio climático. Las floraciones de algas causadas por la contaminación por nitrógeno y fosfatos están devastando la vida acuática. Los bosques vírgenes se están convirtiendo en ranchos y plantaciones.

Los acuíferos se están explotando a un ritmo insostenible para abastecer a los cultivos comerciales, ávidos de agua. El suelo fértil se está convirtiendo en polvo estéril, pues los productos químicos sintéticos matan a los microbios esenciales y los plaguicidas diezman los insectos de los que dependen muchos eslabones de las cadenas tróficas.

En julio pasado, la Fundación Rockefeller informó de que, mientras los estadounidenses gastaron 1,1 billones de dólares en alimentación en 2019, los costes adicionales del sector alimentario que tienen que ver con la salud, el medioambiente, el cambio climático, la biodiversidad y la economía ascendieron a 2,1 billones. Y esa es una deuda que el sector nunca tiene que abonar. El resto del mundo asume el coste. Las empresas que están detrás de ese daño fueron justamente las que ofrecieron soluciones en la cumbre.

Sabemos cómo hacerlo mejor. La agroecología es ideal no solo porque los cultivos son más diversos, sino porque los acuerdos sociales que se aplican son más justos. Los costes ocultos de la agricultura industrial son precisamente los que la agroecología hace explícitos. Sus métodos recompensan la perspicacia de los que están a pie del campo, apoyan los medios de vida de los pobres y protegen la biodiversidad del planeta. Los investigadores y los profesionales adeptos ya están trabajando, enseñando y aprendiendo unos de otros.

Esas redes de conocimiento deshacen los complejos «salvadores» colonialistas que coartan todavía a muchos expertos en desarrollo. En cambio, en la agroecología, como dice Chitaya, «la mujer enseña al hombre, el negro enseña al blanco y el pobre enseña al rico». Chitaya reflexiona sobre las certezas de la lucha que se avecina, sobre todo porque los poderosos parecen redoblar la apuesta por la agricultura industrial. «Se ha perdido mucho. Pero nunca es demasiado tarde para cambiar.»

Raj Patel es profesor de Asuntos Públicos en la Universidad de Texas en Austin y miembro del Panel Internacional de Expertos en Sistemas Alimentarios Sostenibles. Ha publicado *Obesos y famélicos* y *Cuando nada vale nada* y ha codirigido el galardonado documental *The ants & the grasshopper.*



EN NUESTRO ARCHIVO

Al rescate del arroz. Debal Deb en *IyC*, enero de 2021.
Economías alternativas para un mundo sostenible. Ashish Kothari en *IyC*, agosto de 2021.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaça Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes*, *El prospecto de los medicamentos debe simplificarse* y *Las enigmáticas antecesoras de la vida compleja*; **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes*; **Fabio Teixidó:** *Tormentas de vapor*; **Pedro Pacheco:** *El poder de la agroecología*; **Anna Romero:** *Prácticas agrícolas basadas en la biodiversidad*; **Javier Grande:** *La no localidad cuántica en la era de las redes*; **Ernesto Lozano:** *¿Cómo se colorean las imágenes astronómicas?*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción: Un año 75€, dos años 140€ para IyC

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

PRÁCTICAS AGRÍCOLAS BASADAS EN LA BIODIVERSIDAD

Samuel Rebulard | La senda de la agroecología puede ayudarnos a superar los numerosos desafíos de orden económico, político, ambiental y cultural a los que se enfrenta hoy la agricultura.



La asociación de leguminosas y cereales (*en la foto, alfalfa y trigo*) es beneficiosa para ambas plantas gracias al enriquecimiento del suelo y la disminución de las malas hierbas, las enfermedades o el riesgo de erosión, entre otros. Constituye una de las prácticas agroecológicas con las que la agricultura puede dar respuesta a los numerosos desafíos que debe superar a fin de proveer una alimentación de calidad y, al mismo tiempo, reducir su impacto ambiental.



Hace unos 11.000 años en Oriente Próximo, por primera vez la humanidad dejó de depender poco a poco de la caza, la pesca y la recolección como fuentes de sustento. La llamada revolución neolítica se fundamentó en la domesticación de las plantas y los animales, es decir, en la invención de la agricultura y la ganadería. Desde entonces su razón de ser no ha variado: su propósito sigue siendo alimentar a la humanidad con la producción de biomasa vegetal y animal que se traslada del campo al plato. Para cumplir con esta misión, el primer requisito estriba en disponer de superficies cultivables en las que el ser humano guía, tanto como puede, la producción. Añade abonos para fertilizar los cultivos y ejerce una gran presión sobre la biodiversidad que prima las especies deseadas y combate las tenidas por indeseables, como las malas hierbas, los animales o los microorganismos parasitarios.

En este control, los agricultores cuentan con dos aliados: los fitosanitarios y la labranza. Ello ha traído consigo el paradigma agrícola del siglo xx, por el cual la parcela cultivada puede o incluso ha de limitarse a un terreno reducido al papel de matriz que recibe abonos y que carece de vida, donde crecen plantas lo más homogéneas posible en cuanto a especies y, a menudo, también en dotación genética. Esta simplificación avala un tratamiento uniforme, mecanizado y a gran escala, apto para obtener la biomasa esperada. Asimismo, viene acompañada de una especialización de las explotaciones y, a menudo, de una modificación del paisaje. En este contexto suelen desaparecer las superficies improductivas que separan las parcelas, como los setos y los márgenes de los campos y los caminos.

Pero la agricultura es mucho más que una actividad productora de biomasa alimentaria. Desde hace algo menos de treinta años, las expectativas de la sociedad con respecto a este sector han evolucionado mucho y, hoy en día, su gran influencia territorial explica que a sus actores se les haya encomendado, a veces a su pesar, funciones socioeconómicas, ambientales y culturales colectivas: mantenimiento del empleo rural, garantía del bienestar animal, respeto por el territorio, conservación del paisaje, incremento de la biodiversidad local, prevención de la contaminación, almacenamiento de carbono o mejora de la calidad de la alimentación, entre otras.

La agroecología propone una larga lista de respuestas, al menos parciales, a estas nuevas demandas de la sociedad. ¿De qué se trata? El término «agroecología» acuñado a finales de la década de 1920 experimentó un auge en su popularidad a partir de la pasada década de los 90. Suele recibir varias definiciones. Para empezar, desde el punto de vista operativo, la agroecología es un conjunto de diversas prácticas destinadas a crear o a reforzar las funciones ecológicas que son útiles de cara a la mejora de la actividad agrícola. Tales mejoras versan sobre el control de los bioagresores, la gestión de los recursos hídricos, la fertilidad del suelo, la reducción de la erosión, la disminución de los insumos, etcétera. La agroecología es también una ciencia, cuyo nombre alude a la incorporación a la agronomía de los conceptos y los métodos de la ecología científica. En particular, estudia la concepción y la pertinencia de los sistemas agrícolas productivos que persiguen reforzar al mismo tiempo las funciones no productivas que garantizan los seres vivos. Ahora bien, el alcance

PÁGINAS PRECEDENTES: © PHILIPPE GUICHARD

EN SÍNTESIS

La agricultura a menudo se reduce a un suelo convertido en una matriz que recibe abonos en el que crecen plantas homogéneas.

La agroecología podría cambiar el panorama gracias a un conjunto de estrategias diversas que favorecen las funciones ecológicas útiles para la mejora de la actividad agrícola.

En la práctica, consiste en aumentar la heterogeneidad vegetal en los cultivos o en la periferia de las parcelas a fin de aprovechar las complementariedades.

de la agroecología, en tanto que ciencia, en realidad es más amplio. Implica a las ciencias políticas, económicas y sociales, aunque solo sea por la integración en un proyecto de sociedad que gira en torno a la alimentación y sus transiciones que va más allá de la simple dimensión agrícola. Por último, también es un movimiento social, en especial por su capacidad de ayudar a los agricultores más humildes a mejorar la producción sin recurrir a un mayor uso de insumos.

En la práctica, la agroecología se traduce en una diversidad de técnicas, prácticas y nuevos conceptos que son difíciles de resumir. Con todo, si se revisan algunos ejemplos se desprenden ciertas características generales, como la apuesta por la energía solar en detrimento de las fósiles, o el aprovechamiento de los lapsos de tiempo que separan un cultivo del siguiente y los espacios entre las parcelas. En todos los casos, la idea es aprovechar la biodiversidad para mejorar el rendimiento agrícola.

Contra la homogeneidad

Hoy en día, en los países industrializados, todas las plantas cultivadas en un campo o una huerta son genéticamente idénticas. Esta homogeneidad posibilita una gestión uniforme e industrial de la parcela, por cuanto todas las plantas comparten las mismas necesidades nutricionales, la sensibilidad ante los bioagresores y el tamaño y el momento de la maduración. El inconveniente es que esa uniformidad las vuelve vulnerables. Cualquier bioagresor, como un insecto, adaptado al genotipo de una especie cultivada se propagará de una planta a otra sin obstáculos a medida que se vaya reproduciendo, con enormes estragos. Estos efectos son aún más pronunciados habida cuenta de que a escala paisajística, año tras año, en una proporción considerable de las parcelas se cultiva la misma planta con el mismo genoma. Hoy en día ese riesgo se controla sobre todo con la lucha química que, en este contexto de uniformización, favorece la aparición de resistencias a los plaguicidas. Una manera de reducir su uso, al tiempo que se garantiza la regulación de los bioagresores, consiste en aumentar la heterogeneidad biológica en el campo y en sus cercanías.

Históricamente, la siembra de variedades llamadas «poblacionales» aportaba heterogeneidad genética a las parcelas. En el campo, estas variedades agrupan a individuos con genotipos distintos (genoma con diferencias mínimas) y fenotipos cercanos (gran similitud entre ellos). Su productividad máxima es inferior a las variedades de genotipo idéntico, pero suele ser más estable de un año a otro. Otra ventaja como es la puesta en común de los caracteres individuales, tales como la resistencia a las plagas o la tolerancia a la sequía, reduce el uso de insumos al tiempo que garantiza una producción satisfactoria. Su resiliencia y sus pocas exigencias explican el interés renovado de algunos agricultores por estas variedades (a menudo antiguas y modernizadas por su continua evolución en el campo), de ahí que cada vez sea más habitual encontrar, por ejemplo, panes elaborados con variedades poblacionales de trigo. Con todo, su falta de uniformidad y su composición genética cambiante las convierten en poco compatibles con las exigencias actuales del comercio de semillas.

Ampliar aún más la diversidad genética no solo es posible con una única variedad heterogénea, sino con la combinación de variedades de la misma especie dotadas de características complementarias. Así, en la provincia china de Yunnan, la asociación de dos variedades de arroz, una bastante común pero sensible a la piriculariosis, y la otra resistente pero menos productiva, disminuye en gran medida (en un 94 por ciento) los daños causados por el hongo patógeno sin recurrir a los fungicidas. El empleo de cada variedad queda justificado por las características adicionales que aporta a la combinación.

Según el mismo principio, la siembra de variedades precoces de colza en la periferia de las parcelas protege a la variedad de colza que ha sido seleccionada en virtud de sus características productivas. Al florecer antes, la primera variedad atrae a los meliguetes, pequeños coleópteros que atacan los botones florales, lo que limita los daños en el cultivo principal.

En general, el rendimiento de las mezclas varietales es muy desigual: según el cultivo y las variedades, algunas asociaciones favorecen las enfermedades, en tanto que otras son protectoras. A menudo las variedades empleadas no han sido objeto de una selección enfocada a ese uso, lo que explica lo delicada que es la puesta a punto de las combinaciones. Junto con la mejora vegetal tradicional y la obtención de nuevas variedades, el estudio de las mezclas varietales ayudaría a combinar rápidamente en el campo los caracteres de variedades distintas.

Asociación de especies benefactoras

Impulsemos aún más la heterogeneidad genética en los cultivos combinando especies diferentes. Estas mezclas adoptan formas sumamente diversas, pero las más habituales asocian las leguminosas con los cereales. Gracias a la simbiosis que se establece en sus raíces con bacterias, las primeras convierten el nitrógeno atmosférico en formas orgánicas, como los aminoácidos, que enriquecen el suelo circundante, lo que beneficia a los segundos. Combinaciones de guisantes con cebada, o de haba forrajera con triticale, cosechadas a granel, se destinan generalmente a la producción de alimento para el ganado, que aporta una ración rica en nitrógeno.

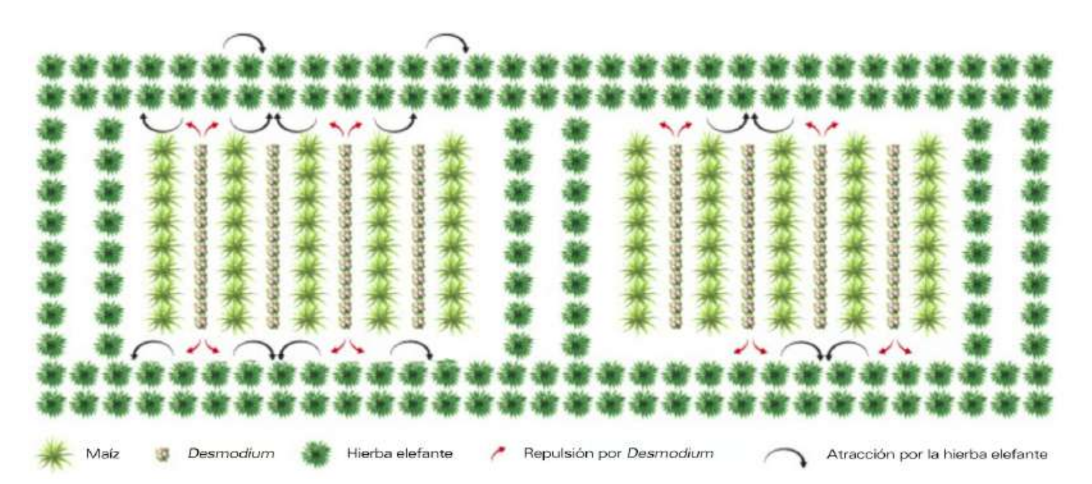
El arquetipo de una asociación como esta es la mipa precolombina (las «tres hermanas»), conocida desde hace más de dos mil años en América Central.

En este sistema de cultivo manual, las judías que trepan enredándose por el maíz suministran nitrógeno a las raíces, mientras que al pie de ambas crecen las calabazas, a menudo con otras especies, lo cual limita la aparición de malas hierbas y la evaporación del agua.

En sus versiones contemporáneas, sobre todo en los sistemas mecanizados, la asociación de cultivos plantea numerosas cuestiones técnicas en cuanto a las modalidades de puesta en práctica y la recolección de los cultivos, cuyos ciclos vitales no siempre están sincronizados. En la agricultura ecológica, la asociación del trigo con guisantes proteaginosos reduce casi a la mitad la proporción de malas hierbas que compiten con



La milpa asocia el maíz, la judía y la calabaza



En la técnica de «atracción-repulsión», nacida a inicios de los 2000, se asocian dos plantas auxiliares a un cultivo principal, en este caso el maíz. Los pirálidos adultos, unos lepidópteros nocivos, son repelidos por *Desmodium* (*Desmodium uncinatum*) y atraídos por la hierba elefante (*Pennisetum purpureum*), una planta que también actúa como trampa contra las orugas de esta especie. Además, *Desmodium* produce sustancias tóxicas contra *Striga*, una planta parásita del maíz. El rendimiento de los maizales protegidos de esta manera casi se triplica.

el cultivo y la incidencia de micosis. El uso equivalente de la tierra, es decir, el cociente entre la productividad de los dos cultivos asociados y la suma de la productividad de cada uno por separado, es cercano al 1,2: la ganancia es, por lo tanto, del 20 por ciento. Se describen asimismo beneficios como estos en la agroforestería. La fecha de la recolección es una solución de compromiso entre la maduración de los granos de una y otra especie que, en caso necesario, se podrán separar con una criba.

Dos ejemplos procedentes de los trópicos ilustran sistemas con asociaciones atípicas. El primero, concebido en Kenia a principios de los 2000, es un sistema de atracción-repulsión que combina tres vegetales.

Su finalidad primordial es la lucha contra los pirálidos, una mariposa cuya oruga perfora el tallo del maíz, y contra *Striga*, una planta parásita que crece sobre las raíces. Como cultivo principal, el maíz se asocia en la parcela con *Desmodium*, una leguminosa fijadora de nitrógeno que repele a la mariposa y que, además, atrae a sus depredadores naturales. Los márgenes de las parcelas se plantan con hierba elefante, una gramínea que actúa como trampa: atrae a los lepidópteros, que quedan adheridos a ella. Los tres vegetales son aptos para el consumo humano y animal. En la práctica, los pirálidos adultos son expulsados del campo hacia la periferia, donde quedan inmovilizados. Al mismo tiempo, el efecto competitivo de la asociación reduce hasta en un 90 por ciento las infestaciones por *Striga*. Hoy en día, decenas de miles de campesinos en África Oriental han adoptado este sistema de bajo coste en insumos, adaptado a una agricultura manual y productiva.

Muchos otros sistemas agrícolas basados en plantas trampa ya están en marcha o en estudio. Atañen a producciones tan variadas como la caña de azúcar, el algodón, el mango, el gombo o el tomate. Así, y llegamos al segundo ejemplo, el proyecto Gamour de la isla de la Reunión propone un conjunto de cinco prácticas destinadas a limitar el uso intensivo de insecticidas contra las moscas de las hortalizas, que afectan sobre todo a las cucurbitáceas (calabacín, chayoteras, melones, pepinos, etc.). En este caso el maíz plantado en los bordes de la parcela desempeña el papel de trampa atrayendo a los insectos indeseados y eliminándolos gracias a un bioplaguicida incluido en cebos en concentraciones bajas. El uso comedido de los insecticidas favorece la llegada de los enemigos naturales de las moscas, tanto depredadores como parasitoides. A tal fin, se instala un original dispositivo en el borde del cultivo: el *augmentorium*.

Se trata de un contenedor de compost totalmente enmallado donde se depositan las hortalizas dañadas por las moscas que también contienen, por tanto, sus huevos y larvas. Las moscas adultas que emergen no pueden escapar por la malla fina. En cambio, las avispas parasitoides, más pequeñas, entran y salen a voluntad y depositan sus huevos en las larvas de las moscas. La población de estas avispas aumenta de forma



En la isla de la Reunión, el proyecto Gamour apuesta por la protección de las cucurbitáceas (en la imagen, chayoteras) gracias al *augmentorium*, un compostador (*a y b*) que atrapa y elimina las moscas de las hortalizas y sus larvas con la ayuda de avispas parasitoides. Las especies de mosca son, entre otras, *Dacus ciliatus* (*c*) y *Dacus demmerezi* (*d*).

automática en las inmediaciones del campo, por lo que contribuyen a reducir las moscas perjudiciales que pululan por el cultivo. Con el uso masivo de insecticidas, los daños causados por las moscas de las hortalizas afectan como media al 40 por ciento de las cosechas, en ocasiones hasta al cien por cien; con estas nuevas prácticas la cifra no alcanza el 20 por ciento.

El espaciotiempo agrícola

A la diversificación espacial puede añadirse la temporal. La rotación de los cultivos, una antigua práctica renovada por la agroecología contemporánea, constituye uno de sus pilares. El principio consiste en sembrar plantas diferentes cada año siguiendo un ciclo de 3 a 10 años. Al espaciar el inicio de la rotación en las parcelas limítrofes, cada una se halla en un estadio distinto de la rotación y el cultivo sembrado difiere del de su vecina. De esta manera, la diversificación temporal a escala de parcela se suma a la diversificación espacial a escala de paisaje. La eficacia de las rotaciones se fundamenta en su duración, superior a cinco años, y en su diversidad. Esta depende de criterios de selección variados y razonados en función de los objetivos del agricultor. La idea es alternar, con el paso de los años, especies de diversas familias que no compartan así las mismas exigencias nutricionales ni los mismos bioagresores, plantas que se siembren en periodos diferentes del año, especies que fertilicen el suelo y otras que sean exigentes, plantas sensibles a la competencia de las malas hierbas y algunas que lo sean menos, como la alfalfa o el trigo sarraceno (denominadas «limpiadoras»).

Las rotaciones evitan que los bioagresores especializados se asienten de forma permanente en las parcelas, dado que su ciclo de vida se ve interrumpido al desaparecer su fuente de alimento de un año al siguiente. Constituyen, por lo tanto, potentes prácticas agronómicas de diversificación y reducción de los plaguicidas, de uso ya extenso en la agricultura ecológica.

Una de las dificultades radica en la elección de las especies. De hecho, aun cuando un agricultor juzgue adecuado introducir una planta poco habitual en la rotación (camelina, altramuz, judía alada, etc.), puede toparse con numerosos obstáculos en el camino. Para empezar, la documentación y el saber hacer técnico en torno a las especies secundarias son mucho menos amplios que en el caso de las especies dominantes. En segundo lugar, las variedades de semillas disponibles para iniciar el cultivo están poco diversificadas y, a veces, mal adaptadas a las condiciones locales. Y eso no es todo. A la hora de vender la cosecha, el conjunto de actores que se van sucediendo no siempre disponen de los medios logísticos e industriales viables desde el punto de vista económico para aceptar pequeños volúmenes de numerosas especies distintas. Por último, la creación de un mercado suficiente para estos cultivos sigue siendo una asignatura pendiente.

La diversificación temporal atañe también al periodo entre los cultivos sucesivos. Las pocas semanas o los pocos meses que separan la cosecha de un cultivo principal de la siembra del siguiente son aprovechables. El principio consiste aquí en explotar los recursos disponibles (su-

perficie, luz, nutrientes, etc.) para repercutir de forma positiva en los parámetros productivos o ambientales de la parcela. A menudo el cultivo intermediario ni siquiera se recolecta, sino que se destruye allí mismo. Por ejemplo, la mostaza extrae del suelo el nitrógeno residual, lo que evita la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales cercanas. Al añadir una leguminosa, la asociación de cultivos enriquecerá por partida doble con nitrógeno el suelo superficial.

Otros vegetales absorben de forma más específica ciertos nutrientes del suelo y, a medida que se descomponen, facilitan su disponibilidad para los cultivos siguientes: las brasicáceas (col, colza, mostaza, berro, etc.) para el azufre, el trigo sarraceno y la facelia para el fósforo o el girasol para el potasio. Estos efectos se suman a otros, en especial la protección contra los nematodos fitófagos (mostaza blanca y facelia) o la atracción de los polinizadores (trigo sarraceno y facelia).

De hecho, cuando el suelo queda cubierto de forma permanente, la biomasa producida aporta ventajas complementarias. La cobertura de materia orgánica limita la erosión, mantiene la humedad y provee refugio y alimento a una fauna y flora diversificadas de hongos y bacterias. En especial, las lombrices denominadas «anécicas» van enterrando esta cobertura vegetal y contribuyen a aumentar el contenido en humus del suelo, al tiempo que se liberan poco a poco los nutrientes movilizados. Sus galerías verticales favorecen la infiltración del agua y el enraizamiento de los siguientes cultivos. El enriquecimiento en materia orgánica que propicia esta cobertura mejora la retención de agua y su aprovechamiento, pues el humus se comporta como una esponja, así como el almacenamiento de carbono a medio plazo. Un metanálisis demostró que las lombrices aumentan la producción en un 25 por ciento como promedio. Por último, la cobertura permanente del suelo entorpece la germinación de las malas hierbas, ya sea de forma directa al impedir el paso de la luz, o bien acogiendo fauna que devora sus semillas.

Es la lucha... biológica

En la agroecología, los aliados llamados a filas no solo son plantas. En un sistema simplificado, la cantidad de enemigos naturales de los bioagresores es reducida, cuando no inexistente. Para estas especies auxiliares, la falta de un lugar de invernada y de fuentes alternativas de alimento



Los sírfidos, como este *Episyrphus balteatus*, son moscas a rayas cuyas larvas devoran los pulgones. ¿Por qué no favorecerlas para librarse de ellos?

les obliga a reconquistar la parcela desde cero cada año. Los bioagresores que completan su ciclo de vida en el mismo cultivo van, pues, un paso por delante. El control biológico por conservación propone restaurar los espacios seminaturales en las cercanías de las parcelas para favorecer la presencia de enemigos naturales en los cultivos.

Por ejemplo, el saúco negro, un arbusto habitual de los setos y linderos europeos, da refugio a una especie de áfido, el pulgón negro, que ignora entonces a otros cultivos. La presencia de saúcos en los márgenes de las parcelas agrícolas da sustento a la diversa fauna de depredadores de los pulgones (mariquitas, crisopas, avispas parasitoides, etc.) que, de ser necesario, atacarán a otros tipos de pulgones que se instalen en los cultivos. Los sírfidos, por ejemplo, son moscas a rayas muy comunes, fáciles de reconocer por su vuelo estático. Las hembras adultas recorren sin dificultad los cientos de metros que separan el borde del campo de su interior para poner los huevos en una colonia de pulgones, que localizan por el olor.

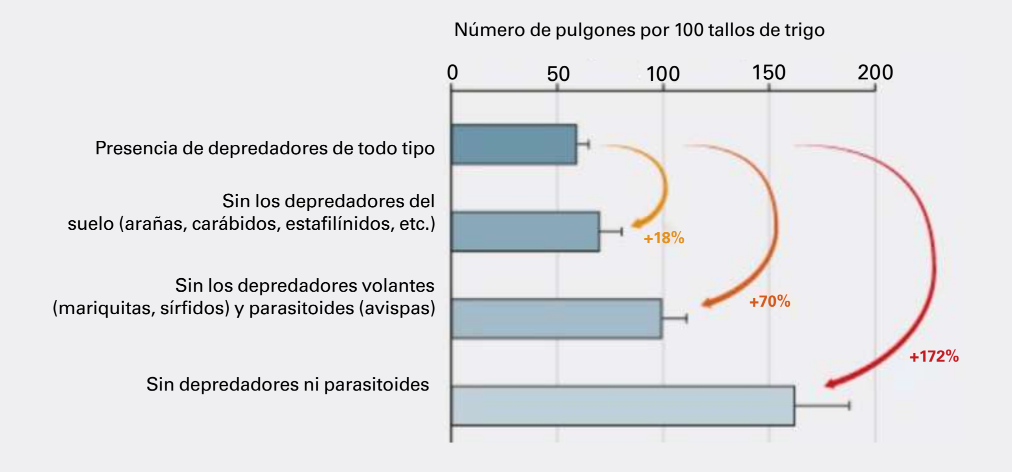
Desde dentro, las larvas atacarán a los pulgones y consumirán, cada una, de 300 a 800 áfidos para completar su desarrollo. Los adultos, por su parte, liban néctar y polen y engendran hasta ocho generaciones por año. ¡Un antiáfidos de eficacia innegable! Pero esta estrategia es inviable en una parcela simplificada, dado que esta carece de las condiciones necesarias para conservar en el cultivo a los sírfidos. De hecho, la presencia de flores (para los adultos) y de pulgones (para las larvas) suele ser muy puntual.

Mantener a los sírfidos exige contar con plantas que ejerzan de reservorio de los pulgones, como el saúco, y la presencia continua de flores entomófilas gracias, entre otros medios, al uso de bandas florales en las inmediaciones con momentos distintos de floración, un prado en flor cercano o un seto que permanezca florido desde el final del invierno (avellano, sauce) hasta el final del otoño (hiedra). Esta flora diversificada servirá como sustento a numerosos polinizadores y a suficientes insectos que alimentarán a los pájaros y a otros depredadores, que no se alejarán de la parcela. A su vez, estos pájaros actuarán como fauna auxiliar, si es necesario, para el control de las orugas, por ejemplo.

En la actualidad se promueve la presencia de insectívoros en los huertos y las viñas colocando cajas nido para herrerillos y carboneros que se alimentan, por ejemplo, de la carpocapsa o gusano del manzano, una polilla cuya oruga destruye los frutos.

Las prácticas agronómicas citadas (rotación, cultivos competitivos, etc.) se ven complementadas por el fomento de una fauna auxiliar eficaz que dificulta la aparición de malas hierbas en los cultivos. En este sentido, un grupo importante de coleópteros, los carábidos, reviste espe-

Cuanto más numerosas y complementarias sean las especies auxiliares, más eficaces serán, por ejemplo, contra los pulgones en el trigo de invierno. Investigadores de la Universidad de Gotinga retiraron diferentes tipos de fauna auxiliar de parcelas experimentales para observar los efectos que su ausencia tenía en los pulgones.



cial importancia, pues algunos son granívoros. Consumen hasta 4000 semillas de malas hierbas por metro cuadrado, lo que representa hasta el 50 por ciento del contenido en simiente del suelo, un reservorio que mengua así de año en año. Estos insectos precisan de franjas de hierba perenne para pasar el invierno y reproducirse y no pueden recorrer más que unas decenas de metros desde su refugio. Ello subraya la importancia de conservar los márgenes con flora diversificada o incluso de plantar franjas herbáceas en medio de las parcelas más extensas.

A escala del paisaje, la heterogeneidad y la complementariedad de los espacios no se limitan a la ocupación diferente de las parcelas cultivadas. El conjunto de elementos seminaturales emplazados contribuye a brindar auténticos servicios a la agricultura misma. Ya se han mencionado los setos y linderos y las franjas herbáceas, pero no se deben olvidar las praderas perennes, las zonas húmedas, las acequias o los arbolados, entre otros. Con todo, la conclusión de una amplia revisión bibliográfica, que abarcó cerca de 7000 lugares de todo el mundo, es que el vínculo, positivo o negativo, entre la composición del paisaje y el control de las especies indeseables por la fauna auxiliar es muy variable. Como en tantos otros aspectos de la agroecología, lo que resulta cierto en un lugar no es forzosamente generalizable.

Animales y plantas

La complementariedad fundamental entre animales y plantas, revalorizada en las estrategias agroecológicas, funciona también con los animales de producción. Se emplea desde hace milenios, pero la novedad actual consiste en sopesar y optimizar este vínculo en los sistemas integrados. La rizipiscicultura asiática constituye un ejemplo famoso, alentado encarecidamente por los organismos internacionales, como la FAO.

En ella, el cultivo del arroz se combina con la cría simultánea de peces de agua dulce, como las carpas, cuyas deyecciones fertilizan el arrozal, mientras que en la superficie los patos dan cuenta de algunas malas hierbas, parásitos y fitófagos. El aporte de nitrógeno recae en un helecho acuático, *Azolla*, que fija este elemento de la atmósfera gracias a su simbiosis con la cianobacteria *Anabaena azollae.*

En los campos de los países occidentales, asociaciones como estas resultan más difíciles de imaginar, pues la especialización territorial de finales del siglo xx ha mermado las posibilidades de complementariedades locales. Así, las regiones de grandes cultivos importan el nitrógeno mineral sintético como fertilizante, mientras que las áreas ganaderas importan soja y deben gestionar el enorme volumen de desechos nitrogenados excretado por los animales. A pequeña escala, replantearse esta división y promover la instalación de producciones complementarias evitaría flujos transcontinentales de materias que carecen de sentido ecológico. Finalmente, la forma de alimentar a los animales constituye en sí misma una fuente de mejora del rendimiento ambiental de la agricultura. La ganadería lechera convencional, por ejemplo, depende esencialmente del maíz y de la soja, a pesar de que las vacas pueden comer hierba, si bien en ese sentido algunas razas son más eficientes que otras. Las praderas perennes que serían necesarias compondrían paisajes agropastorales favorables al bienestar animal, verdes todo el año y, dado que requieren pocos insumos o ninguno, se erigirían como importantes reservorios de la biodiversidad, por otra parte no sujetos a la erosión del suelo. Además, almacenarían un volumen considerable de carbono. Desde luego, la cantidad de leche y carne producida así es menor, pero su calidad, reconocida por las D.O.P. u otro tipo de etiquetado, beneficiaría al ganadero, que obtendría el máximo provecho de ella.

Por una nueva revolución

¿Cómo generalizar las distintas vertientes de la agroecología de campo aquí descritas? Como se ha mencionado, uno de los principios consiste en apostar por la energía solar. De hecho, a través de la fotosíntesis y la síntesis de biomasa vegetal, esta enriquece con nitrógeno la tierra, mejora la fertilidad del suelo, aumenta indirectamente la producción alimentando a los polinizadores, las plantas de servicio y la fauna auxiliar, genera el manto de materia vegetal muerta que limita la erosión y favorece la infiltración del agua, además de almacenar carbono en el suelo. Para ello, la energía solar no debe captarse solo para la síntesis de biomasa alimentaria, sino también para una «biomasa de servicio» viva (especies asociadas, setos, bardizas, franjas herbáceas, praderas)

La rizipiscicultura asocia el cultivo del arroz a la cría de peces cuyas deyecciones fertilizan las plantas. A veces, la presencia complementaria de patos libra a la parcela de algunas malas hierbas.

o muerta (manto vegetal en descomposición, materia orgánica edáfica).

Al aprovechar al máximo la energía solar, así como los intervalos de tiempo y espacio, la agroecología implica a fin de cuentas promover una biodiversidad funcional seleccionada, o favorecida, y optar por flujos de materia localizados. La dificultad consiste en orientar la diversidad biológica hacia los servicios ecológicos esperados, al tiempo que se limitan los posibles inconvenientes. Si los principios de la agroecología son aplicables a todos los contextos locales y a todos los tipos de producción, no es menos cierto que su adopción requiere una fase experimental a fin de adaptarlos lo mejor posible.

Por último, los sistemas como estos son más resilientes. Por un lado, porque la diversificación de la producción amortigua los contratiempos de la meteorología y del mercado. Por otro, porque la sustitución de la técnica humana por servicios ecológicos reduce la dependencia de los proveedores de insumos, carburantes, material o préstamos. Todos esos motivos hacen que las estrategias agroecológicas suelan gozar de prioridad en las agriculturas humildes con escaso capital. La integración de los principios de la agroecología puede ser paulatina, pero precisa a menudo de una reformulación completa del sistema productivo, una transformación que pone frenos a la transición. La idea básica consiste en romper con el razonamiento que asocia un insumo a cada problema y en contemplar una estrategia integral de los sistemas agrícolas y alimentarios. Después de la revolución neolítica, ¡ha llegado la hora de la revolución agroecológica!

Samuel Rebulard es ingeniero agrónomo y ejerce como profesor de ecología, botánica y agronomía en la Universidad París-Saclay.



EN NUESTRO ARCHIVO

Parasitología. Asociación de cultivos en el control de plagas. J. G. Loya Ramírez et al. en *IyC*, mayo de 2005.

La gestión ecológica de los suelos agrícolas. Joan Romanyà Socoró en *IyC*, octubre de 2012.

Retos del desarrollo agrícola. César Fernández-Quintanilla en *IyC*, abril de 2019.

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

EL CONCEPTO DE FUNCIÓN EN BIOLOGÍA Y FÍSICA

Alfredo Marcos | ¿Es posible lograr una teoría unificada de las funciones en la naturaleza?

Cuando pongo en marcha el robot aspirador se producen numerosos efectos. Por ejemplo, el polvo que hay en la alfombra acaba aspirado hacia el interior de la máquina. También se producen ondas acústicas y calor, y hasta puede que un juguete olvidado en el suelo sea desplazado unos cuantos centímetros. El primero de los efectos mencionados es una función, el resto no. Por algo el aparato se llama «aspirador», y no «productor de ruido», «calefactor» o «desplazador de juguetes». ¿Qué diferencia hay entre un efecto funcional y uno que no lo es? Desde el punto de vista puramente físico no hay ninguna: el movimiento del electrodoméstico produce otros movimientos en su entorno, eso es todo. Diríamos que la diferencia depende de la intención con que fue diseñado y utilizado. Esto es, la funcionalidad de ciertos efectos la pone la intención de un agente humano. Tenemos aquí lo que podríamos llamar una «teoría intencional de las funciones» (INT).

Ahora bien, hablamos con toda naturalidad de que William Harvey descubrió, ya en el siglo XVII, que la función del corazón consiste en bombear sangre a través de un circuito formado por venas y arterias. Luego el corazón, un órgano vivo, también parece tener una función. No solo eso, sino que dicha función *explica* tanto la presencia de este órgano en el ser vivo como su configuración anatómica. No en vano, las explicaciones en biología son a menudo de carácter funcional. Explicamos la presencia de alas o de huesos neumáticos en las aves por la aportación que estas estructuras hacen al vuelo. Muchas veces, quienes estudian los seres vivos no cejan hasta hallar una función para cada uno de los órganos. Cuando tal función se encuentra, tenemos la sensación de haber explicado la presencia y la estructura del órgano en cuestión. Cuando no se da con ella, siempre queda una cierta impresión de déficit explicativo.

Así, cuando los paleontólogos se toparon con los restos fósiles de *Pachycephalosaurus*, quedaron intrigados por la estructura abombada de su cráneo. Puede que tal peculiaridad resultase de ciertas restricciones ontogenéticas y que careciese de función. Pero lo cierto es que inmediatamente empezaron a surgir hipótesis sobre su posible función. ¿Se trataba de un arma para luchar cabeza contra cabeza? ¿Servía para atacar el costado de algún competidor, predador o presa? ¿Constituía una suerte de caja de resonancia para proyectar sonidos a larga distancia? Hoy se sigue publicando y debatiendo sobre cuál fue la función más probable de ese órgano. Ello se debe a que solo cuando encontramos una buena hipótesis funcional, apoyada por indicios independientes, nos damos por satisfechos y consideramos que la presencia y la estructura del órgano quedan explicadas.

Pero cuando se trata de seres vivos no podemos aplicar sin más la teoría INT. Resultaría extraño afirmar que el cráneo de un dinosaurio es de tal o cual forma porque alguien lo diseñó así para que cumpliese cierta función. En el caso del corazón, pensamos que este tiene por función bombear sangre, mientras que el ruido rítmico

que produce es, en principio, un mero efecto no funcional. Sin embargo, no atribuimos la diferencia a la intención del «usuario», que quiere que su sangre circule pero no está especialmente interesado en que suene una especie de tambor en su pecho. Dicho de otro modo: cuando se trata de seres vivos, la teoría INT no resulta muy iluminadora a la hora de distinguir entre efectos funcionales y no funcionales.

Se podría abogar por la completa supresión de las explicaciones funcionales en biología. De esta manera nos limitaríamos, al igual que en las ciencias físicas, a la explicación por causas eficientes. Nadie pretende explicar la erupción de un volcán por la función que pueda tener. Por poner un ejemplo, ni la construcción orográfica ni la producción de malvasía están entre las posibles causas de la última sacudida del Timanfaya. Pero, en el caso de los seres vivos, extintos o no, las explicaciones funcionales no se dejan eliminar con tanta facilidad.

Este hecho supuso un auténtico quebradero de cabeza para los filósofos de la ciencia más tradicionales, como Ernst Nagel o Carl Hempel, quienes tomaban la física como paradigma de toda disciplina científica. Los modelos formales de explicación que propusieron se ajustaban mal a la explicación funcional, tan usada en las ciencias biológicas. Se llegó a pensar que era la propia biología la que tenía un cierto déficit de cientificidad y que, a la larga, debería prescindir de las explicaciones funcionales. Sin embargo, lo cierto es que la biología es una ciencia de pleno derecho, mientras que los modelos de explicación propuestos por la filosofía de la ciencia eran demasiado pobres y estaban demasiado apegados al modo de explicación clásico de la física.

Ante esta situación, se ha propuesto una teoría de las funciones específica para los seres vivos: la teoría seleccionista (SEL). Según esta, un rasgo será funcional en un ser vivo si es el resultado de un proceso de selección; en caso contrario, no se le podrá atribuir funcionalidad. En otras palabras, un rasgo será funcional si el cumplimiento de cierta función es la causa, a través de un proceso de selección natural, de la presencia y estructura de dicho rasgo. La causa de la presencia y de la estructura del corazón es precisamente que bombea sangre. Ha sido seleccionado por ello y los seres vivos que poseen un corazón tienen una ventaja evolutiva. Sus ancestros han sobrevivido y dejado descendencia, entre otras cosas, porque su corazón funcionaba bien. El domo craneal de los dinosaurios es como es debido a la función que cumple. Gracias a ella, los individuos que poseían tal estructura pudieron sobrevivir y dejar su herencia genética. Aquí la función es causa de la estructura, pero no hace falta apelar a las intenciones de nadie para dar cuenta de ello. Es la selección natural la que se encarga de eliminar lo menos funcional.

Hay, por tanto, una diferencia crucial entre INT y SEL. La primera apela a intenciones conscientes, la segunda no. Pero hay también una semejanza. En ambas, la función es vista como causa de la presencia y estructura de ciertos elementos. Por ello, ambas teorías son *etiológicas:* en ambas, la función es causa. De ahí también su fuerza explicativa. Ambas remiten, en última instancia, a un artículo clásico de Larry Wright titulado «Functions» y publicado en 1973.

Hemos visto que INT se aplica bien al campo de lo artificial, e incluso con ciertos matices al campo de lo social (instituciones, costumbres, ritos o leyes cumplen también funciones). No obstante, no es de gran ayuda en el terreno de lo biológico, donde hemos de recurrir a SEL. El mero hecho de que necesitemos más de una teoría de las funciones ya es en sí mismo un problema. Pero es que, además, SEL no carece de limitaciones propias. Si un rasgo cualquiera aparece *ex novo* en un ser vivo, no podremos decir que sea funcional por más que resulte beneficioso para la vida del organismo en cuestión, ya que no es el fruto de un proceso de selección. Aquí la aplicación de SEL produce un resultado extraño. Súmese a ello que, muchas veces, no hay forma de reconstruir la historia evolutiva de un rasgo. Además, en el uso común, se suele decir que un rasgo tiene una función aunque ni de lejos nos conste la selección del mismo. Harvey, por razones obvias, no leyó a Darwin, y aun así podía afirmar que la función del corazón consiste en el bombeo de sangre.

Puede que la dificultad resida precisamente en el carácter etiológico de las dos teorías que venimos considerando, así que quizá no debamos obsesionarnos por el aspecto causal de las funciones. Tal vez, cuando hablamos de funciones no estamos hablando de causas, sino de la aportación que alguna estructura o rasgo hace a

la operación conjunta de un sistema. Esto cambia el objeto de la explicación funcional; es decir, cambia lo que explican las funciones. Surge de este modo una tercera teoría, la cual parte de las ideas expuestas por Robert Cummins en un artículo de 1975 titulado «Functional analysis». Según esta, la atribución de una función a cualquier entidad no nos sirve para explicar su existencia o posición, sino solo para explicar el funcionamiento del sistema en que se halla integrada. Esta teoría, que depende de un enfoque sistémico, se suele abreviar como SYS.

En la actualidad se debate sobre estas tres grandes líneas teóricas, enfrentadas, modificadas o combinadas entre sí en diversos modos. Es conveniente que identifiquemos aquí los puntos esenciales en torno a los cuales se centra hoy en día el debate. En primer lugar, está la cuestión del *realismo* de las funciones. Es decir, se discute si las funciones son entidades ficticias, si tienen únicamente una base subjetiva, o si, por el contrario, son propiedades con existencia real, objetiva e independiente de cualquier sujeto cognoscente. Aquí se localiza el punto más débil de SYS, pues el hecho de que algo sea tomado o no por funcional depende de la delimitación que el observador haga del sistema. Por ejemplo, al motor de un automóvil solemos atribuirle la función de impulsar las ruedas. Pero, si lo ponemos en el contexto de una orquesta (como ha hecho Audi recientemente con tres de sus modelos), entonces su función pasa a ser la de producir ciertos sonidos. ¿Podríamos decir lo mismo de los órganos de un ser vivo? ¿Sería razonable pensar que su función depende del contexto sistémico en que los coloque un observador?

Por otro lado, del mismo modo que las estructuras están compuestas de partes que tienen a su vez estructura, las funciones atribuibles a un órgano o un artefacto también parecen guardar entre sí relaciones jerárquicas. El motor tiene una función en el coche, del mismo modo que los cilindros, pistones o bielas tienen su función dentro del motor. El corazón tiene funciones en el organismo, y la válvula mitral las tiene en el corazón. Se discute, en consecuencia, si las distintas teorías en liza dan cuenta correctamente de la composicionalidad jerárquica de las funciones.

A todo esto se suma la difícil cuestión de la *normatividad* de las funciones, quizá la más ardua y crucial de todas. A diferencia de otras disposiciones y efectos, podemos atribuir una función a una entidad aunque esta no la cumpla o la cumpla mal. Decimos que la función del ala del pájaro o del avión es el vuelo, y seguimos diciéndolo aunque se trate de un ala rota y el vuelo sea imposible. Afirmamos entonces que cumple mal su función, o que no la cumple, pero no que carezca de ella. Se debate, por tanto, qué teoría de las funciones da cuenta en mayor medida de este esquivo rasgo de las mismas que tanto las diferencia de los simples efectos.

El debate afecta también a la naturaleza de las explicaciones funcionales. Constatado el hecho de que se siguen empleando en biología y en otras disciplinas, las distintas teorías de las funciones tratan de establecer dónde reside su fuerza explicativa, qué ganancia cognoscitiva nos aportan y qué es lo que explican. Por último, se discute sobre la posibilidad de desarrollar una teoría unificada de las funciones: una que dé cuenta de las mismas tanto en el ámbito de lo biológico como en el dominio de lo artificial o lo social.

Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.



PARA SABER MÁS

The logic of functional analysis. Carl G. Hempel en *Symposium on Sociological Theory*, págs. 271-287. Dirigido por L. Gross. Harper and Row, 1959.

Functions. Larry Wright en *The Philosophical Review*, vol. 82, págs. 139-168, abril de 1973.

Functional analysis. Robert Cummins en *The Journal of Philosophy*, vol. 72, págs. 741-765, noviembre de 1975.

Teleology revisited, and other essays in the philosophy and history of science. Ernest Nagel. Columbia University Press, 1979.

What functions explain: Functional explanation and self-reproducing systems. Peter Mclaughlin. Cambridge University Press, 2001.

Funciones en biología: Una perspectiva aristotélica. Alfredo Marcos en *Diálogo Filosófico*, núm. 74, págs. 231-248, agosto de 2009.

Función biológica. Cristian Saborido en *Diccionario Interdisciplinar Austral*. Dirigido por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Naturaleza y finalidad. Héctor Velázquez Fernández en *IyC*, mayo de 2015.

La filosofía de la biología en el siglo XXI. Alfredo Marcos en *IyC*, marzo de 2017.

El sentido de la vida. José Cuesta en *IyC*, diciembre de 2020.

FORO CIENTÍFICO

EL PROSPECTO DE LOS MEDICAMENTOS DEBE SIMPLIFICARSE

Jonathan J. Darrow | Los médicos y los pacientes necesitan conocer la información esencial para la toma de decisiones

El pasado junio, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA) aprobó un nuevo tratamiento contra el alzhéimer, el aducanumab, sin que existan datos fehacientes de que realmente frene el deterioro cognitivo. En protesta, tres expertos abandonaron el comité asesor. En el debate sobre cómo debería ser el proceso de aprobación de fármacos destaca la ausencia, en multitud de casos, de una descripción clara de sus efectos beneficiosos.

Las agencias reguladoras y los círculos de expertos saben que la mayoría de los fármacos nuevos solo ofrecen un pequeño beneficio adicional con respecto a otros ya disponibles. Y aunque se difunde el análisis minucioso de los datos de los ensayos clínicos, los documentos más importantes son inescrutables para casi cualquiera. En la ficha técnica y en el prospecto, dirigida al facultativo la primera y al paciente el segundo, debería constar claramente que la eficacia está demostrada y de qué modo.

La normativa de la FDA exige «pruebas sustanciales» de la eficacia, pero este no deja de ser un término vago. Cada vez son más los ensayos clínicos en que se recurre a «criterios de valoración indirectos» o a parámetros no clínicos que predicen una «posibilidad razonable» de que pueda haber un beneficio tangible. Pero un estudio demostró que el 52 por ciento de las 65 correlaciones halladas entre medicamentos oncológicos y tumores carecían de solidez. En la ficha técnica del aducanumab figura el «cociente combinado de los valores estandarizados de captación en la TEP del amiloide beta», un parámetro confuso que difícilmente sería trasladable al paciente. Si el resultado de un estudio no puede explicarse en términos que el paciente pueda entender, la agencia reguladora debería repensar si el criterio de valoración empleado es aceptable para la autorización de un medicamento.

Tampoco hay un requisito de eficacia sustancial, lo que deja en manos del paciente suponer el valor terapéutico del medicamento. He escrutado documentación de la FDA referente a fármacos aprobados que en los medios generalistas habían sido descritos como «vitales», «sumamente eficaces» o «curativos». Los datos objetivos raramente demuestran que sea así. En 2021 hallé una decena de artículos elaborados por autores distintos que revisaban las pruebas sobre los beneficios de una serie de medicamentos recientemente aprobados. En conjunto, solo entre el 2 y el 31 por ciento brindaba algún



beneficio, calificable a lo sumo como moderado, en comparación con otros tratamientos ya existentes. El aducanumab podría pasar por un ejemplo excepcional, pero no lo es en absoluto.

Hace más de una década que la comunidad médica ya intentó resolver los problemas vinculados con la ficha técnica. La FDA exige ahora que contenga un recuadro de media página en la parte superior donde deben figurar las advertencias y las precauciones, la posología y la vía de administración, pero, por desgracia, no el grado de eficacia real.

En un informe redactado para el Congreso de EE.UU. en 2010, la agencia aseguraba que incluir información clara referente a la eficacia en el poco espacio que ofrece el recuadro no sería posible muchas veces, por cuanto la información médica es demasiado compleja y variable. A diferencia de mí, pocos pacientes y médicos pueden dedicarse en exclusiva a indagar en las ventajas reales de un medicamento o en su regulación, así que pueden tener la tentación de estimar su valor por su precio. En mi opinión este es un aspecto francamente mejorable, y el drástico aumento del coste de los medicamentos nos indica que ha llegado la hora de replantear esta cuestión.

Los pocos fármacos que ofrecen explicaciones comprensibles acerca de la eficacia dan pistas de lo útil que puede ser esa información. Por ejemplo, en el prospecto estadounidense del anticonceptivo Yasmin (drospirenona y etinilestradiol) se indica que «las tasas de embarazo observadas en los ensayos clínicos fueron inferiores a uno por 100 mujeres-año». Sunscreen, una especialidad de venta sin receta en EE.UU., incorpora información cuantitativa del beneficio condensada en una sola cifra: el factor de fotoprotección o FPS. Si bien no es un indicador perfecto y pocas personas saben cómo se calcula, el uso repetido permite al consumidor saber con el tiempo qué FPS necesita para no sufrir quemaduras solares.

No siempre es posible describir los beneficios con una sola cifra, como sucede con el FPS o el índice de embarazos indeseados, pero las etiquetas nutricionales de los alimentos servirían como modelo. Las columnas bien definidas y el texto ordenado permiten leer la información básica de un vistazo, como las calorías o el contenido de vitaminas y minerales.

La Agencia Europea de Medicamentos (EMA) ha reconocido la necesidad de «facilitar más información sobre los beneficios que esté escrita en un lenguaje entendible», pero las autoridades sanitarias de todo el mundo están tardando en reaccionar. Creo que una parte del problema reside en que exponer los beneficios limitados de un medicamento sería algo tan incómodo para los organismos reguladores, los profesionales sanitarios y las farmacéuticas como frustrante para los pacientes esperanzados. Pero existe el deber ético de informar al paciente de los beneficios y de los riesgos.

Contar con información clara también modificaría los incentivos de las empresas farmacéuticas. La transparencia absoluta favorecería a los medicamentos que son más eficaces frente a los que han sido autorizados a pesar de su escaso margen de mejora.

Jonathan J. Darrow es profesor de medicina en la Universidad Harvard, en Cambridge, y de derecho en la Universidad de Bentley, en Waltham, Massachusetts.



Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2021.

Con la colaboración de nature

PLANETA ALIMENTACIÓN

LA MODA DE LA «TWINCOSMÉTICA»

José Manuel López Nicolás | El controvertido beneficio de combinar nutricosméticos con cosméticos tradicionales

La «twincosmética» es una nueva tendencia que diferentes influencers, como Longoria, Beckham o Madonna, han popularizado en los últimos tiempos. Consiste en abordar el cuidado de la piel desde dos sectores: el interno, mediante suplementos nutricionales con fines estéticos (nutricosméticos), y el externo, a través de cosméticos tradicionales. Se promulga que la ingesta de nutricosméticos y la aplicación simultánea en la piel de cremas, sueros u otros productos logran una sinergia que multiplica la efectividad de los productos empleados de forma individual y prolonga la duración de los resultados en la piel.

Pero ¿funciona en realidad la twincosmética? Primero hay que evaluar caso por caso y estudiar si cada nutricosmético o cosmético tradicional cumplen, por separado, lo que prometen en su etiquetado. Me centraré aquí en los twincosméticos a base de ácido hialurónico, un polisacárido compuesto por disacáridos de ácido D-glucurónico y N-acetil-D-glucosamina, que fue aislado en 1934 por el farmacéutico alemán Karl Meyer y su colega John Palmer. El ácido hialurónico, de textura viscosa, tiene en nuestro organismo una función estructural. Se halla en altas concentraciones en las articulaciones, los cartílagos y la piel. Una de sus propiedades principales es contrarrestar las arrugas que aparecen durante el envejecimiento. También estimula la producción de colágeno y modifica la morfología de los fibroblastos. Sin embargo, con la edad el ácido hialurónico se degrada y su síntesis disminuye. Para compensar esta situación, la industria cosmética incorpora este compuesto a sus productos desde hace más de dos décadas.

Analicemos, por un lado, el efecto de la ingesta de nutricosméticos que contengan este polisacárido. El máximo organismo en materia de alimentación, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), ha sido contundente: según su Panel de Expertos en Nutrición, Alergias y Dietéticos, no se ha demostrado una relación causa-efecto entre el consumo oral de ácido hialurónico y el mantenimiento de las articulaciones o la protección de la piel frente a la deshidratación.

Entonces, ¿por qué se permite que algunos nutricosméticos enriquecidos con ácido hialurónico publiciten propiedades relacionadas con la salud articular o la piel? Porque los fabricantes les añaden astutamente el 15 por ciento de la cantidad diaria recomendada (CDR) de algún



micronutriente (vitamina o mineral) cuyos beneficios para las articulaciones o a la piel sí han sido reconocidos por la EFSA. Sin embargo, en la publicidad de estos nutricosméticos no se detalla que los micronutrientes añadidos no solo son superfluos, sino que podemos encontrarlos en alimentos cotidianos mucho más nutritivos y baratos.

Un ejemplo de ello es la vitamina C. Muchos nutricosméticos ricos en ácido hialurónico contienen también el 15 por ciento de la CDR de esta vitamina, un micronutriente del que la EFSA ha aprobado más de una decena de alegaciones saludables, muchas de ellas relacionadas con aspectos estéticos. Sin embargo, consumir nutricosméticos con vitamina C no tiene sentido, ya que las personas ingerimos entre un 200 y un 300 por ciento más de la necesaria. La CDR de este micronutriente es de 80 miligramos, por lo que añadiendo a un nutricosmético 12 miligramos (el 15 por ciento de la CDR) ya pueden publicitarse muchas propiedades saludables. Pues bien, en una sola naranja hay 70 miligramos de vitamina C, casi seis veces más que la cantidad mínima exigida por la EFSA. ¿Qué les parece?

Analicemos, por otro lado, los cosméticos tradicionales con ácido hialurónico, muy presente en las cremas hidratantes. ¿Es efectivo? Sí lo es, debido a una de sus propiedades principales. Los cosméticos tradicionales están formados por tres componentes principales: los emolientes, que rellenan los intersticios entre los corneocitos (un tipo de células de la piel) y aportan flexibilidad y suavidad; los oclusivos, que forman una barrera impermeable sobre la piel que evita la evaporación de agua y dan sensación de tersura; y los humectanctes, que captan el agua ambiental y, al ser altamente higroscópicos, impiden la pérdida de agua de la piel. Pues bien, el ácido hialurónico es un potente humectante, ya que tiene la capacidad de retener el agua en un porcentaje equivalente a miles de veces su peso, con lo que evita que le piel se deshidrate en exceso.

Sin embargo, no todos los tipos de ácidos hialurónico presentes en las cremas hidratantes son iguales. Los fragmentos de ácido hialurónico con un peso molecular superior a 300 kilodaltons no pueden penetrar en la piel, por lo que ejercen su función hidratante solo en la epidermis. Los de menor peso molecular sí tienen la capacidad de penetrar hasta la dermis, donde rellena los espacios y combate las arrugas. No obstante, no resulta tan efectivo como las inyecciones de ácido hialurónico, tan empleadas en medicina estética.

Estimados lectores, el análisis de la twincosmética del ácido hialurónico es claro. Solo uno de sus componentes, la cosmética tradicional, cumple sus objetivos. Sin embargo, hoy en día no existen pruebas de que los nutricosméticos de este omnipresente polímero sean necesarios. En conclusión, la supuesta sinergia que se consigue al combinar nutricosméticos y cosméticos tradicionales poco podrá funcionar si uno de sus dos brazos no demuestra ser eficaz.

José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.

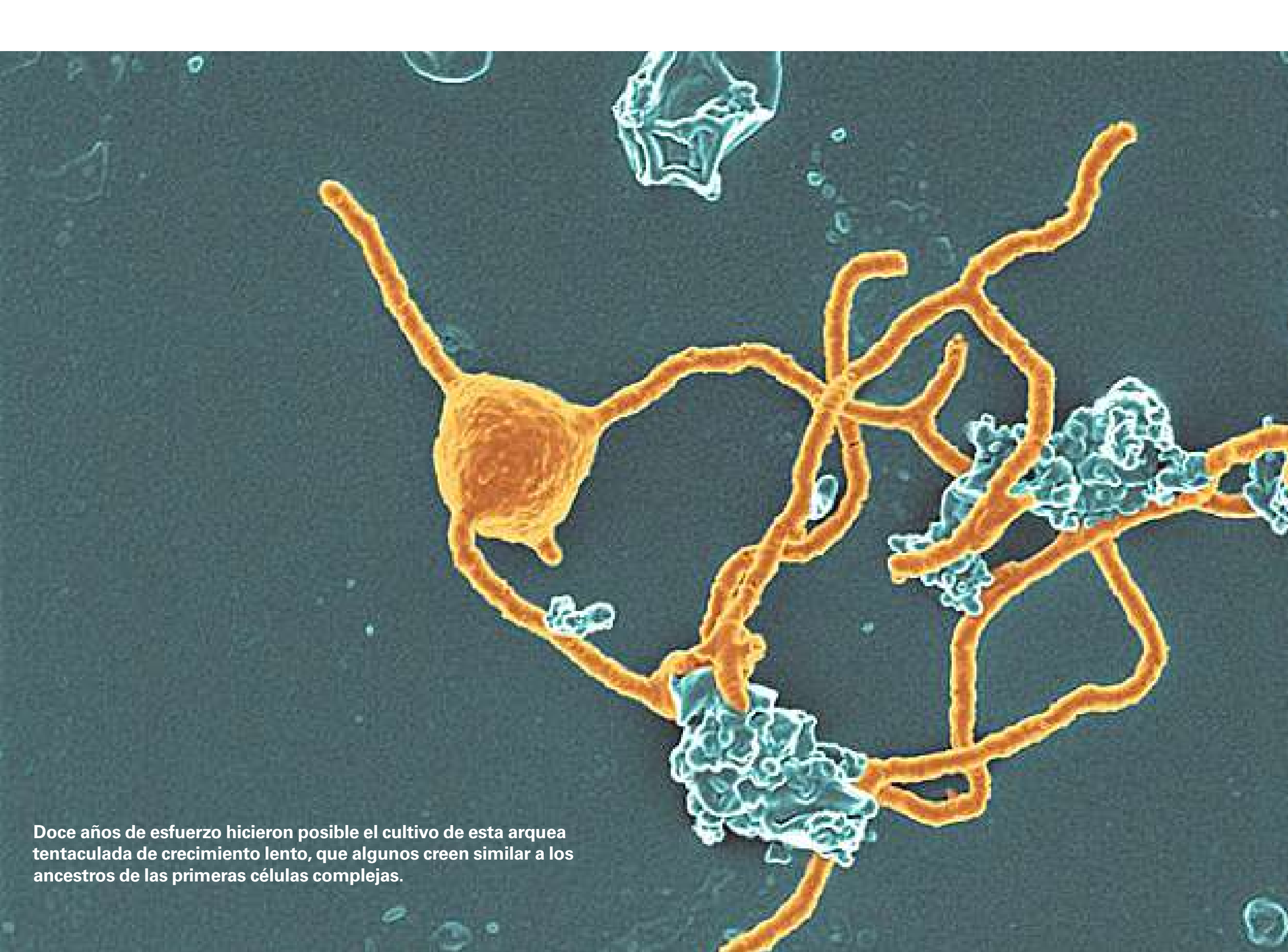


ISTOCK

EVOLUCIÓN

LAS ENIGMÁTICAS ANTECESORAS DE LA VIDA COMPLEJA

Amber Dance | A medida que la ciencia ensancha los conocimientos acerca de las misteriosas arqueas, surgen pistas sobre el origen de las células complejas que conforman el ser humano, las plantas e infinidad de otros seres vivos



Doce años de esfuerzo hicieron posible el cultivo de esta arquea tentaculada de crecimiento lento, que algunos creen similar a los ancestros de las primeras células complejas.

El biólogo evolutivo David Baum quedó sorprendido cuando al hojear el borrador de un artículo topó con un conocido lejano. Este investigador de la Universidad de Wisconsin contemplaba absorto una arquea: un microbio perteneciente a una clase conocida ante todo por habitar en ambientes extremos, como fumarolas abisales o lagos de aguas ácidas, cuyo aspecto resulta engañosamente similar al de una bacteria, pero que tiene tanto en común con ella como lo que pueda tener con un plátano. La retratada en aquella prepublicación de *bioRxiv* en agosto de 2019 esgrimía una especie de tentáculos que le conferían la vaga apariencia de una albóndiga con espaguetis pegados.

Baum ha dedicado muchísimo tiempo a imaginar el aspecto que pudieron tener los ancestros más remotos de la especie humana y este microbio era un candidato perfecto.

Las arqueas son mucho más que bichos raros que pululan en lugares yermos, pues resulta que están bastante extendidas. Además, podrían contener la clave sobre la aparición de la vida compleja en la Tierra. Numerosos científicos sospechan que una arquea primitiva dio origen al vasto grupo de los eucariotas, que engloba las amebas, los hongos, las plantas o las personas, si bien es igualmente posible que tanto ellos como las arqueas sean descendientes de un ancestro común algo más antiguo.

La célula eucariota es equiparable a un edificio palaciego dividido en estancias, como un núcleo que alberga el material genético y otras dependencias separadas donde se genera la energía y se sintetizan las proteínas. Una teoría extendida sobre su evolución plantea que descendería de una arquea que, en algún momento, se fusionó con otro microbio.

No ha sido nada sencillo contrastar esa idea, empero, en parte porque el cultivo y el estudio de las arqueas en el laboratorio no es una tarea fácil. Tan poca ha sido la atención que han recibido que aún permanecen envueltos en tinieblas aspectos básicos de su biología, como el crecimiento y la multiplicación.

Ahora, los investigadores podrían estar más cerca que nunca de respuestas plausibles en lo



concerniente a su evolución. Gracias al creciente interés que han suscitado estos microorganismos a menudo olvidados y a la incesante invención de métodos de cultivo en el laboratorio, los biólogos celulares pueden escrutarlos como nunca antes. Las publicaciones dedicadas a este enigmático grupo microbiano casi se han duplicado en la última década y convierten el naciente estudio de su biología en un tema fascinante, en opinión del microbiólogo molecular Iain Duggin, de la Universidad Politécnica de Sídney. «Ahora podemos hacer algunos experimentos básicos interesantes y conseguir algunos descubrimientos fundamentales. Podremos adquirir una visión mucho más clara de la evolución de los protoeucariotas.»

Las imágenes que dejaron boquiabierto a Baum, posteriormente publicadas en *Nature*, ofrecían esa visión. Eran el fruto de 12 años de empeño y esfuerzos por cultivar una arquea que supuestamente mantendría un parentesco estrecho con la madre de los primeros eucariotas. Los microbiólogos de todo el mundo quedaron maravillados ante aquellos primeros planos, pero para Baum daban vida a su teoría preferida.

Cinco años antes, él y su primo, el biólogo celular Buzz Baum, del Laboratorio de Biología Molecular (LMB) en el Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, publicaban una hipótesis sobre el origen de los eucariotas. Ambos aventuraban que el tataradeudo de todos ellos podría haber poseído apéndices alargados, muy parecidos a los de la protagonista del citado artículo. Suponían que bacterias próximas a ellas habrían quedado envueltas por esos apéndices y acabaron transformadas en un componente definitorio de la célula eucariota: los orgánulos generadores de energía llamados mitocondrias, de aspecto similar a un comprimido. David Baum recuerda que mientras miraba aquellos filamentos similares a espaguetis pensó: «Madre mía, teníamos razón».

Misterios fundamentales

Si una célula eucariota es realmente una arquea sobrealimentada, entonces será preciso conocer las arqueas para descifrar cómo surgieron las células complejas. Hace décadas que los estudiosos de los eucariotas y las bacterias ahondan en procesos como la división y el crecimiento celular, pero los entresijos de las arqueas siguen en buena medida sumidos en las tinieblas. «Las arqueas hacen las cosas de manera distinta, una y otra vez», afirma Sonja Albers, microbióloga molecular en la Universidad de Friburgo, en Alemania. Por ejemplo, las proteínas afines asumen funciones diferentes en especies distintas. Según Duggin, eso las convierte en un tema de estudio tan fascinante como importante, pues es posible hacer comparaciones entre grupos diferentes y buscar pistas sobre el origen del núcleo y de otras innovaciones importantes.

Ya vivan en el suelo o en el mar, algo que todas las células comparten es la división como modo de multiplicación. Así lo hizo el ancestro común de toda la vida celular en la Tierra, aunque el proceso comenzó a adquirir tonos distintos conforme los organismos se adaptaban a sus nichos.

Es posible explorar la evolución analizando esa divergencia. Cualquier mecanismo que sea común a todas las formas de vida celulares señalará hacia la biología heredada de las células primigenias. En cambio, los sistemas compartidos exclusivamente por las arqueas y los eucariotas, o por las bacterias y los eucariotas, brindarán pistas sobre qué antepasados aportaron los diversos componentes de la biología eucariota. Así, por ejemplo, la membrana flexible que separa la célula eucariota del ambiente exterior recuerda a la de las bacterias.

Duggin estudia la división celular en *Haloferax volcanii.* Esta arquea es una amante de los ambientes hipersalinos, como los del Mar Muerto, no de los volcánicos, a pesar de su apellido, concedido en reconocimiento al microbiólogo Benjamin E. Volcani. Para ser una extremófila, su cultivo en caldo salino no entraña excesiva dificultad y es fácil ver dividirse sus células planas y grandes al microscopio.

Pese a las enormes diferencias que separan las bacterias, las arqueas y los eucariotas, todos comparten un par de sistemas de división celular. En las bacterias, una proteína denominada FtsZ forma un anillo en el lugar por donde la célula se dividirá. Duggin y sus colaboradores han observado lo mismo en *H. volcanii*. Así pues, FtsZ, parece tener su origen en la base misma del árbol evolutivo.

Las arqueas también han ayudado a descubrir otras proteínas arcaicas. Una es SepF, que el grupo de Albers ha descubierto que es esencial para la división de *H. volcanii*. Junto con FtsZ, podría formar parte de un «sistema mínimo» primordial para la división celular, según Nika

PÁGINAS PRECEDENTES: HIROYUKI IMACHI, MASARU K. NOBU Y JAMSTEC, MODIFICADO POR *NATURE*

Pende, bióloga evolutiva del Instituto Pasteur de París. Pende ha analizado la distribución de los genes de FtsZ y SepF en una variedad de microbios y ha seguido su rastro en el tiempo hasta el último antepasado común universal de todas las células vivientes.

No obstante, en algún momento de la evolución, algunas arqueas asignaron el cometido de la división celular a otro conjunto de proteínas. Y aquí es donde entra en juego el último trabajo de Buzz Baum. Su grupo ha estado estudiando la arquea *Sulfolobus acidocaldarius*. En su caso el nombre es todo un acierto: le encanta el ácido y el calor. Los miembros del laboratorio usan guantes de jardinero para no tocar el líquido corrosivo donde habita y han tenido que diseñar una cámara especial que les permita ver su división al microscopio sin vapores ni necesidad de recurrir a focos de luz fría.

> «Docenas de modelos sometidos a escrutinio se han quedado por el camino al perder toda verosimilitud»

El equipo de Baum comprobó que el conjunto de proteínas que organiza el anillo de división es completamente distinto. En los eucariotas, donde fueron descubiertas por primera vez, ninguna participa en la división y desempeñan cometidos más extendidos, pellizcando y arrancando pedacitos de las membranas por toda la célula para crear receptáculos membranosos llamados vesículas, amén de otros más pequeños. Las proteínas se denominan ESCRT (complejos endosómicos de distribución necesarios para el transporte). En *S. acidocaldarius*, el equipo descubrió que proteínas arqueanas afines a esas versátiles pellizcadoras dirigían el anillo de división, lo que sugiere que las versiones primitivas de ESCRT evolucionaron en el ancestro arqueano de los eucariotas.

Entretanto, FtsZ acabó convertida en la tubulina eucariota, que confiere estructura a nuestras células. Tales descubrimientos apuntan a que el ancestro arqueano de los eucariotas probablemente contaba con un conjunto de herramientas destinado a modelar y dividir las células, conjunto que la selección natural adaptó a las necesidades de las células descendientes más complejas.

La tataradeuda se deja entrever

¿Pero qué tipo de célula fue aquella arquea ancestral? ¿Y cómo se encontró y fusionó con sus compañeras bacterianas?

La bióloga Lynn Margulis fue la primera en proponer, en 1967, que los eucariotas nacieron cuando una célula fagocitó a otras. La mayoría de los entendidos coinciden en que tuvo que ocurrir algo así, pero discrepan en el momento en que sucedió y el modo en que surgieron los compartimentos internos de los eucariotas. «Docenas de modelos sometidos a escrutinio se han quedado por el camino al perder toda verosimilitud», explica Sven Gould, biólogo celular evolutivo en la Universidad Heinrich Heine de Düsseldorf. Otras teorías se encumbrarán o caerán conforme la biología celular aporte nuevos conocimientos sobre las arqueas.

En numerosos modelos se presume que las células que acabaron deviniendo eucariotas ya eran bastante complejas, provistas de membranas flexibles y compartimentos internos, antes de su encuentro con la bacteria que acabaría convirtiéndose en la mitocondria. En esas teorías es preciso que las células adquieran algún modo de engullir material externo (fagocitosis) para atrapar una bacteria pasante con un mordisco fatídico (*véase el recuadro* «Dos modos de crear células complejas»). En cambio, Gould y otros creen que las mitocondrias se adquirieron antes y que habrían ayudado a impulsar una célula más voluminosa y más compleja.

El modelo de los Baum es uno de los pocos que explica cómo pudieron surgir las mitocondrias sin la fagocitosis. A David Baum se le ocurrió la idea por primera vez cuando estudiaba la carrera en la Universidad de Oxford, allá por 1984. Según él, el proceso da comienzo con las arqueas y las bacterias circundantes compartiendo recursos. Las arqueas comenzaron a abombar y a estirar la membrana externa con el fin de multiplicar la superficie y facilitar así el intercambio de nutrientes. Con el tiempo esas protuberancias se alargaron y envolvieron a las bacterias, hasta que estas quedaron, más o menos, dentro de la arquea. Al mismo tiempo, la

membrana externa original de la arquea, ahora empequeñecida por los largos tentáculos que la rodeaban, evolucionó hasta convertirse en la separación del incipiente núcleo, a la par que la nueva membrana externa de la célula adquiría su forma cuando algunos tentáculos largos crecieron perimetralmente, lo que agrandó mucho la célula en comparación con su antecesor arqueano. Este proceso difiere de la fagocitosis en que comienza con una comunidad microbiana y tiene lugar a lo largo de una dilatada escala de tiempo, no de un solo mordisco.

El tutor de David Baum le dijo que la idea era imaginativa, pero falta de pruebas. La dejó aparcada. Pero ya había compartido su entusiasmo por las ciencias biológicas con su primo Buzz, un niño entonces, durante las comidas familiares en Oxford. «Es una de las razones por las que me hice biólogo», recuerda Buzz.

David decidió redactar su teoría en 2013. Envió un borrador a Buzz, que ya dirigía su propio laboratorio y que le ayudó a elaborarla un poco más. La pareja definió varios aspectos de la biología que respaldan su idea, como el hecho probado de que las arqueas y las bacterias actuales conviven e intercambian nutrientes. Tuvieron problemas para publicar su propuesta, hasta que finalmente lo lograron en *BMC Biology*, un año más tarde.

Buzz recuerda que la idea fue recibida con entusiasmo, sobre todo por parte de los biólogos celulares. Pero en 2014 David seguía pensando que solo tenían un 50 por ciento de probabilidades de estar en lo cierto.

Y entonces, cinco años después, aparecieron las imágenes de la albóndiga con espaguetis. Los Baum no cabían de gozo.

Aquella especie era la primera perteneciente al grupo de las arqueas de Asgard que se había podido cultivar. Descrito en 2015, este grupo microbiano posee genes de proteínas que muchos consideran notablemente similares a las de los eucariotas. No se tardó en sospechar que el ancestro arqueano de los eucariotas bien pudo ser algo parecido a una arquea asgardiana. Al señalar a una posible tataradeuda, el descubrimiento reforzaba la hipótesis de los Baum.

El representante asgardiano, que todavía carece de nombre definitivo y es conocido como Candidatus 'Prometheoarchaeum syntrophicum', creció en un biorreactor junto con un par de «pegotes» microbianos con los cuales compartía nutrientes. Curiosamente carece de una membrana interna compleja y no parece haber sido jamás capaz de fagocitar a sus socios, ni por asomo. Posee tres sistemas que se pueden vincular a la división celular: proteínas que son equivalentes a la FtsZ, las ESCRT y la actina, esta última clave en la contracción muscular pero también implicada en la división de los eucariotas. Los cultivadores todavía no han averiguado cuál interviene en su división, afirma el miembro del equipo Masaru Nobu, microbiólogo del Instituto Nacional de Ciencias Industriales y Tecnologías Avanzadas de Toquio.

La gran sorpresa vino cuando las células arqueanas cesaron de dividirse y comenzaron a brotar tentáculos de ellas. Los Baum conjeturan con que tal vez amplíen el intercambio de nutrientes con las bacterias que las acompañan en el cultivo, como predice su modelo de la célula ancestral.

A raíz de esas observaciones, Nobu y sus colaboradores elaboraron una teoría sobre la evolución de los eucariotas que tiene mucho en común con la hipótesis de los Baum. En ella un microbio extiende filamentos que acaban engullendo a su compañero1. «Me gusta nuestra hipótesis porque hace compatible que esas complejidades que son exclusivas de los eucariotas, el núcleo y las mitocondrias, surgiesen al mismo tiempo», dice Nobu.

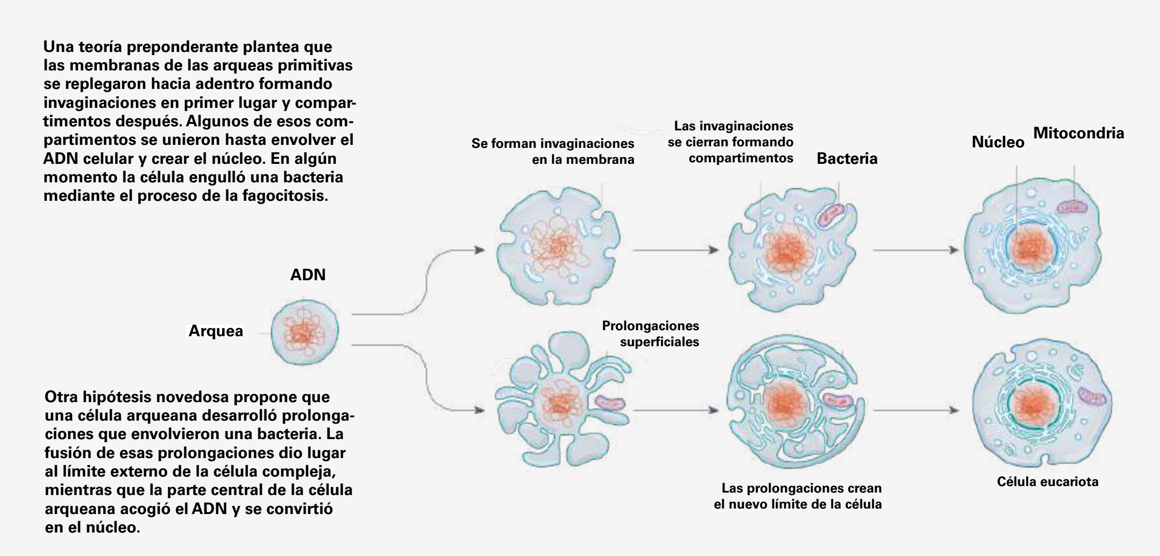
Cultivando la confianza

Las imágenes de la arquea asgardiana ayudaron realmente a reforzar la teoría de los Baum. «Resulta sumamente interesante que formen esas prolongaciones», cree Anja Spang, microbióloga evolutiva y codescubridora de las asgardianas en el Real Instituto Neerlandés de Investigaciones Marinas, en la isla de Texel. «Así todo queda ligado, porque si un ancestro pudo formar esos apéndices, es posible que se creara un consorcio de arqueas y bacterias mucho más estrecho.»

Los Baum calculan ahora que hay una probabilidad del 80 por ciento de que estén en el buen camino, y no son los únicos que han ganado en confianza. Ramanujan Hegde, bioquímico del LMB que estudia las proteínas de membrana, participa en la próxima edición del manual Molecular Biology of the Cell, la séptima. Junto con sus colaboradores han decidido que la hipótesis de los Baum sustituya al modelo de la fagocitosis que aparece en la edición actual. Pero, por supuesto, aún no hay pruebas: Hegde es prudente y emplea términos vagos como «podrían tener».

Dos modos de crear células complejas

Numerosos investigadores piensan que las células de los eucariotas, dotadas de complejas estructuras internas, son el fruto de la fusión de una bacteria con otro microbio llamado arquea. Con el tiempo, las bacterias acabaron transformadas en mitocondrias, los orgánulos productores de energía de la célula eucariota. ¿Pero cómo tuvo lugar la unión?



NICK SPENCER/*NATURE*; FUENTE: B. BAUM Y D. A. BAUM EN *BMC BIOLOGY*, VOL. 18, 2020

Es más, otros, como el propio Gould, sostienen que el modelo de los Baum no acaba de explicar la forma en que esas prolongaciones de la membrana acabaron convertidas en láminas y rodearon la célula hasta crear un límite externo cerrado, ni cómo adquirieron las características de las membranas bacterianas. En su intento por explicar las similitudes con estas últimas membranas, Gould y sus colaboradores han concebido un modelo que se fundamenta en el hecho de que tanto las bacterias de vida libre como las mitocondrias desprenden vesículas con regularidad. En 2016 propusieron que el protoeucariota adquirió primero las mitocondrias (no concretan de qué modo) y que estas segregaron vesículas en el interior de la célula. Esas vesículas aportaron los materiales de membrana que la incipiente célula eucariota necesitaba para crear una estructura interna y la barrera externa. Esto explicaría por qué las membranas eucariotas semejan las de las bacterias, asegura Gould.

Estos y otros modelos competidores podrían ser respaldados o refutados conforme los investigadores sigan cultivando y estudiando las arqueas; en los laboratorios ya se han conseguido multiplicar con éxito docenas de ellas. Buzz Baum y sus colaboradores están investigando la simbiosis en las arqueas y analizan los árboles filogenéticos microbianos para someter a prueba su idea con más rigor. Nobu y su equipo están investigando con detenimiento las prolongaciones y trabajan con otras asgardianas.

Podría haber más indicios aguardando a ser descubiertos. Por ejemplo, los Baum creen posible que existan eucariotas cuyas membranas tentaculadas no estén desligadas del todo de la membrana externa de la célula, lo que vendría a ser un paso intermedio en su teoría. Al menos, lo que cada día parece más probable, es que debemos nuestra existencia a una suerte de vieja historia de amor entre una arquea y una bacteria. «Somos parte bacterias, parte arqueas y parte nuevas innovaciones. Somos mejor juntos», concluye Buzz Baum.

Amber Dance, doctora en biología, es escritora científica especializada en microbiología, biología celular, neurociencia y técnicas de laboratorio.

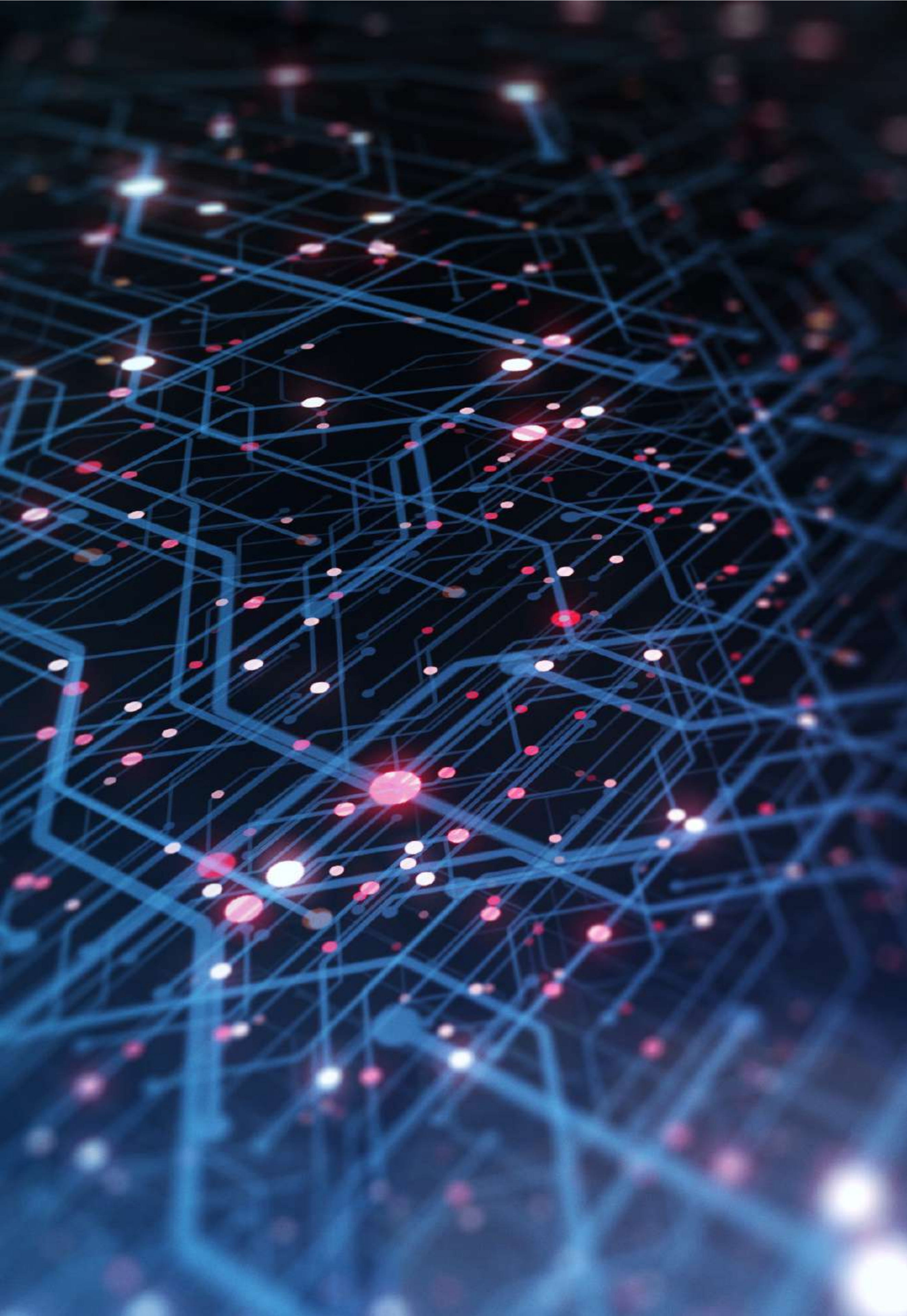


Artículo original publicado en Nature, traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2021.

Con la colaboración de nature

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuevos datos sobre el origen de la célula eucariota. James O. McInerne y Mary J. O‹Connell en *IyC*, abril de 2017.



FÍSICA CUÁNTICA

LA NO LOCALIDAD CUÁNTICA EN LA ERA DE LAS REDES

Marc-Olivier Renou, Nicolas Gisin y Nicolas Brunner | Las leyes cuánticas implican la no localidad de algunos procesos físicos. Aunque el fenómeno se entiende bien para fotones emitidos por una sola fuente, el caso de una Internet cuántica plantea varias incógnitas

Hoy en día, una parte importante de nuestras vidas circula por Internet: nuestros datos bancarios o médicos, nuestros correos electrónicos, nuestros mensajes en las redes sociales o nuestras fotos. Para garantizar que esa información se transmite de forma segura sin que puedan robarla, leerla o alterarla, se han desarrollado diversas técnicas de encriptación. Estas se basan en problemas matemáticos que, en ausencia de la correspondiente clave criptográfica, no pueden resolverse en un tiempo razonable con los ordenadores habituales. Por ejemplo, algunos algoritmos se basan en el hecho de que descomponer un número entero muy grande en sus factores primos es un problema de este tipo.

Sin embargo, el desarrollo de los ordenadores cuánticos podría hacer que esas técnicas de cifrado quedaran obsoletas de aquí a unos años. Los llamados «algoritmos cuánticos» emplearían toda la potencia de la física cuántica para resolver en poco tiempo problemas inabordables para sus competidores clásicos. Un ejemplo es el algoritmo propuesto en 1994 por el matemático estadounidense Peter Shor, que en teoría es capaz de factorizar números enteros muy grandes con gran rapidez. Así, cuando hayamos puesto a punto los ordenadores cuánticos, la transmisión de datos bancarios durante las compras en línea ya no estará a salvo de los ataques. ¿Cuál será la solución? Los fenómenos cuánticos que explican la capacidad de desciframiento de esa futura generación de ordenadores también podrían ser la clave para construir una «Internet cuántica» altamente segura.

El concepto de Internet cuántica engloba muchos dispositivos e ideas, cuyo desarrollo representa un reto tanto tecnológico como teórico. En particular, la importante propiedad que nos interesa aquí y que se manifiesta en los sistemas cuánticos, desde los más sencillos que manipulan solo pares de fotones (las partículas elementales de la luz) hasta los más complejos como la Internet cuántica, es la «no localidad». Y si la física cuántica tiene fama de ser contraria a la intuición, se debe sobre todo a su carácter no local.

¿Un principio evidente?

Comencemos recordando en qué consiste el principio de localidad. Según este, cualquier información o influencia se propaga de ma-

nera continua a una velocidad finita menor o igual que la de la luz, en virtud de las leyes de la relatividad especial. *A priori*, el principio de localidad parece evidente si nos guiamos por nuestra intuición, forjada a partir de nuestra experiencia del mundo clásico y macroscópico. Sin embargo, a nivel microscópico la situación es muy distinta.

Para ser más precisos, el principio de localidad no es compatible con la mecánica cuántica si admitimos un supuesto, el de la «libertad de elección», o independencia en la elección de las mediciones. Según esta hipótesis, es posible elegir la forma de medir un sistema independientemente del propio sistema, y no hay ninguna causa que explique a la vez esta elección y el estado del sistema.

Al pasar del mundo macroscópico al universo microscópico y cuántico, algunos de los principios fundamentales de la física clásica dejan de ser aplicables y deben abandonarse. Si imaginamos a un detective armado de su intuición «clásica», tendría grandes problemas para resolver algunos de los enigmas del mundo microscópico. Se enfrentaría a situaciones donde, por ejemplo, no tendría sentido hablar simultáneamente de la posición y la velocidad de un sospechoso en el momento del crimen, el asesino podría hallarse en dos lugares al mismo tiempo y la víctima podría estar a la vez viva y muerta.

Desde el nacimiento de la mecánica cuántica hace casi un siglo, los físicos han demostrado experimentalmente la solidez de esta teoría. Aunque las leyes cuánticas chocan con nuestra intuición, han aprendido a desarrollar una «intuición cuántica» que les permite familiarizarse con ellas y comprenderlas mejor. Así, la no localidad cuántica tiene una rica historia, salpicada de debates, avances teóricos y experimentos pioneros. Los físicos han puesto a prueba sus ideas en experimentos con fuentes que emitían dos o tres fotones. Y los resultados de tales ensayos solo podían explicarse cuestionando el principio de localidad (o el de la libertad de elección).

Aunque hoy entendemos bien la no localidad en los experimentos con una única fuente de fotones, la Internet cuántica trastoca esta idea. Y es que no es posible concebir una red para la Internet cuántica sin introducir varias fuentes independientes de fotones. El pasar de una sola fuente a dos, tres o más altera por completo el análisis del sistema y la forma en que se manifiesta la no localidad.

La Internet cuántica trastoca la noción de no localidad

En el último decenio, a medida que aumentaba el interés por la Internet cuántica, los físicos teóricos también se han ocupado de esos sistemas con varias fuentes de fotones, aunque solo han empezado a entrever cómo replantear la noción de no localidad. La formulación de este fenómeno no sería única, sino que dependería del contexto donde se manifiesta. A la larga, una comprensión más profunda de las sutilezas de la no localidad en redes a buen seguro conducirá a nuevas aplicaciones e incluso contribuirá a mejorar la Internet del mañana.

Para abordar los retos de la no localidad cuántica, es necesario examinar el modo en que los físicos han ido comprendiendo este concepto en los últimos cien años.

PÁGINAS PRECEDENTES: QUARDIA/ISTOCK/GETTY IMAGES

EN SÍNTESIS

Según el principio de localidad, toda información o influencia se propaga a una velocidad inferior o igual a la de la luz. Sin embargo, la física cuántica parece ser incompatible con este principio.

En el experimento GHZ, que mide el estado de los fotones emitidos por una sola fuente, se ha demostrado que las correlaciones entre los resultados no pueden explicarse sin abandonar el principio de localidad.

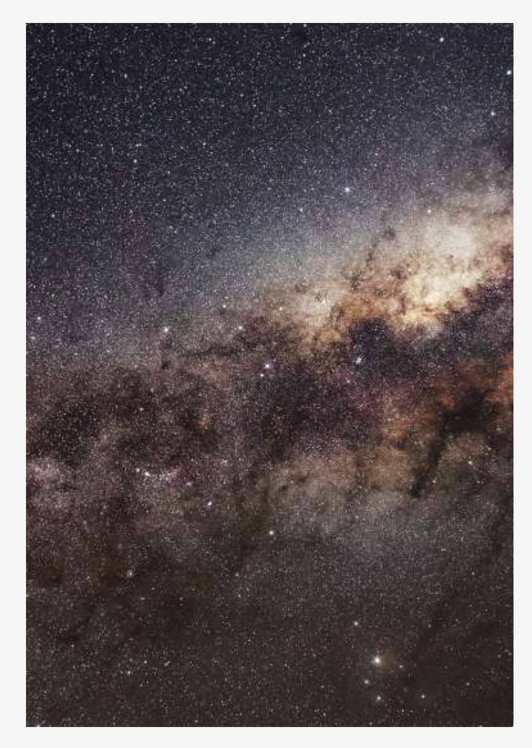
En una futura Internet cuántica intervendrán muchas fuentes independientes de fotones. Los investigadores están intentando entender qué ocurre con la no localidad cuántica en tales casos.

Libertad de elección y superdeterminismo

En los experimentos de física cuántica de tipo test de Bell, como el experimento GHZ, los investigadores obtienen correlaciones entre los resultados de mediciones elegidas y realizadas en varios puntos del espacio. Tales correlaciones son inexplicables si aceptamos el principio de localidad y el de la libertad de elección de las mediciones.

La elección de las mediciones se basa en un componente aleatorio, como un lanzamiento a cara o cruz. Se podría aducir que, en el fondo, el resultado de lanzar una moneda no es aleatorio: depende de la manera en que la tiremos o del movimiento del aire alrededor de la moneda. Por lo tanto, una forma de explicar las correlaciones sin renunciar al principio de localidad sería revocar el principio de la libertad de elección. Pero no es tan sencillo. Incluso si los lanzamientos de moneda que sirven para elegir las mediciones están determinados por ciertas causas, para explicar el experimento GHZ dichas causas tendrían que conspirar de forma «inteligente» a fin de reproducir el resultado previsto por la física cuántica. En el experimento GHZ con gatos que hemos descrito, haría falta que una causa común determinase tanto los gatos que llegan a los detectores como los resultados de los lanzamientos de moneda, de modo tal que los resultados de las mediciones coincidiesen exactamente con las predicciones de la teoría. Ese sería un argumento «superdeterminista». Y para que este «determinismo inteligente» no falle y permita explicar los test de Bell, debe estar ajustado con precisión a lo largo de todo el universo.

En concreto, los experimentos de Bell actuales emplean generadores de números aleatorios que extraen su aleatoriedad de fuentes tan diversas como las fluctuaciones de la luz láser, la radiación que emitieron los cuásares hace miles de millones de años, los bits resultantes de digitalizar viejas películas de Hollywood o los decimales del número pi. Así que, para explicar tales experimentos en el marco superdeterminista, habría que pretender que existe un vínculo entre ellos y el director Martin Scorsese o la luz de los cuásares. Esta visión «conspirativa» de la física lleva enseguida a afirmar que «todo está escrito de antemano». Pero tal afirmación no es falsable, por lo que no pertenece al ámbito de la ciencia, y cabe preguntarse qué sentido tienen las leyes físicas si ya está todo escrito. La mayoría de los físicos rechazan esta línea de pensamiento y admiten de forma implícita el principio de la libertad de elección o, siendo más precisos, que los experimentos no son superdeterministas.



En 2017, el equipo de Anton Zeilinger, de la Universidad de Viena, llevó a cabo un test de Bell. En vez de lanzar monedas al aire, emplearon la radiación de dos estrellas situadas a más de 500 años luz de la Tierra: los investigadores realizaban una medición u otra en función de si la frecuencia de los fotones procedentes de esas estrellas superaba o no un cierto valor. Según el superdeterminismo, alguna causa habría ajustado con precisión las emisiones de las dos estrellas hace más de 500 años para que los resultados del experimento fueran compatibles con las predicciones de la física cuántica. Usando cuásares, la fecha de ese ajuste se remontaría a hace miles de millones de años.

En un estadio muy temprano de la exploración de los fundamentos de la mecánica cuántica, los físicos encontraron dificultades para concebir y formular esa situación paradójica. ¿Cómo podía ser que dos principios evidentes para los científicos de principios del siglo xx (la localidad y la libertad de elección) fueran incompatibles con la física cuántica? En la década de 1930, Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen abrieron el debate en un famoso artículo donde expresaban su sorpresa ante una «misteriosa acción a distancia» incluida en el formalismo de la mecánica cuántica. Los tres investigadores demostraron que, según este formalismo, un evento ocurrido en un lugar puede influir de forma instantánea en la descripción matemática de otro sistema físico distante, lo que parecía contravenir el principio de localidad (que aún no se había conceptualizado en su formulación moderna).

Según Einstein y sus colaboradores, eso evidenciaba que la teoría cuántica era incompleta, y que debía existir una teoría alternativa que condujera a las mismas predicciones sin caer en esa paradoja evidente. Sin embargo, para el físico danés Niels Bohr, uno de los «padres fundadores» de la mecánica cuántica, había que aceptar esa peculiaridad en el formalismo de la teoría, que no conducía a ninguna contradicción en la práctica.

ESO/F. CHAR

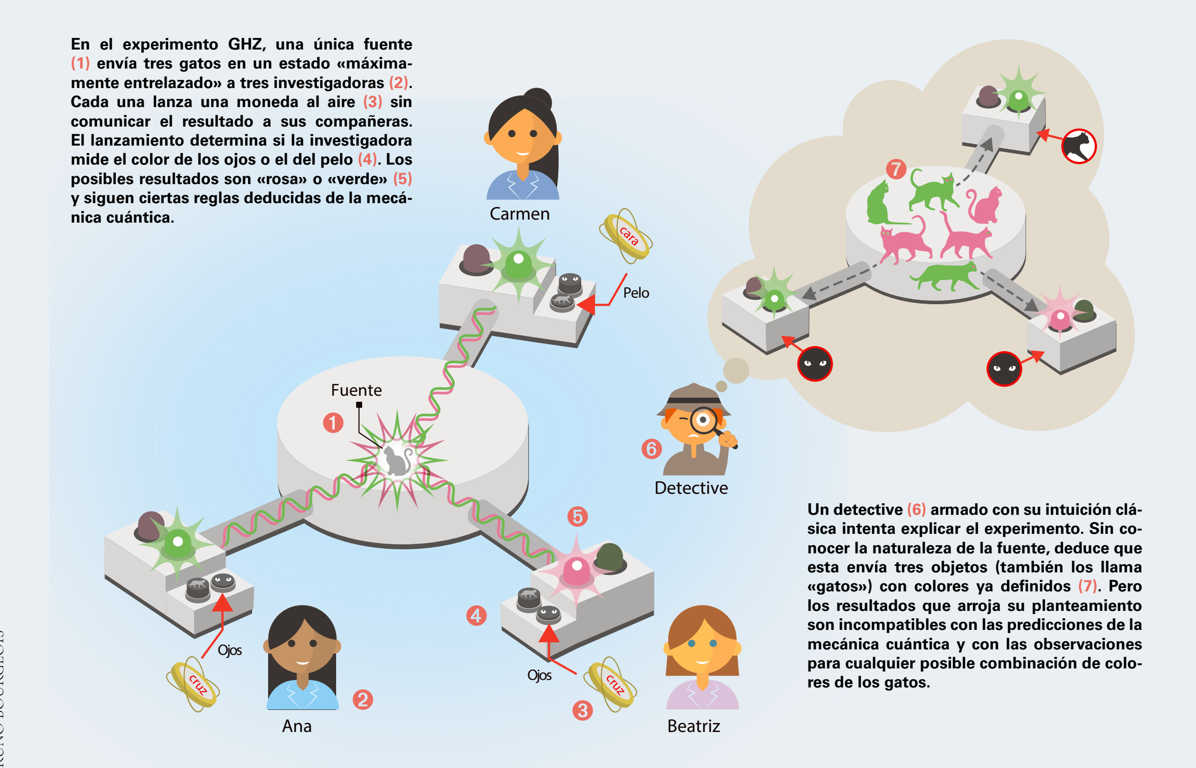
Los gatos cuánticos del test GHZ

En el experimento GHZ, una fuente envía simultáneamente tres fotones entrelazados a tres científicas, Ana, Beatriz y Carmen. Las investigadoras realizan al mismo tiempo una única medición de la polarización, en una cierta dirección de entre dos posibles. Aquí hemos optado por denominar «gatos» a los fotones y «color» a la polarización. Ese color puede referirse al pelo (*P*) o a los ojos (*O*) y ser verde (*v*) o rosa (*r*). Cada investigadora decide qué atributo (*P* u *O*) medir lanzando una moneda al aire, sin comunicar su elección a las demás. La mecánica cuántica predice las siguientes dos situaciones. Cuando todas las científicas midan *P*, encontrarán un número impar (1 o 3) de resultados *v* y, por lo tanto, un número par (2 o 0) de resultados *r*. Cuando una mida *P* y las otras dos midan *O*, obtendrán un número par (0 o 2) de resultados *v* y, en consecuencia, un número impar (3 o 1) de resultados *r*. Las observaciones confirman estas predicciones.

¿Puede un detective explicar los resultados de las mediciones apoyándose en su intuición clásica y macroscópica, en particular en el principio de localidad? Su razonamiento le lleva a pensar que la fuente del experimento envía gatos verdes o rosas, con ojos verdes o rosas, es decir, con colores bien definidos. Cada vez, tres de estos gatos llegan a los aparatos de medida de las tres científicas. Así, el detective puede enumerar las 64 posibles configuraciones de los tres gatos enviados a las tres científicas. Consideremos una de esas 64 configuraciones, mostrada en la ilustración, donde Ana recibe un gato rosa con ojos verdes, y Beatriz y Carmen reciben gatos verdes con ojos rosas. En función del resultado de los lanzamientos de moneda, pueden realizar diversas medidas. Si, como en el dibujo, Ana y Beatriz miden los ojos y Carmen el pelo, este argumento clásico indica que obtendrían un número par de resultados *v* (más concretamente, dos), lo cual es compatible con las observaciones del detective y con las predicciones cuánticas. Y eso siempre es así cuando dos de las investigadoras miden los ojos, y la tercera, el pelo. Sin embargo, si las tres miden el pelo, cabría esperar un número par (dos) de resultados verdes, algo que no concuerda con las predicciones cuánticas ¡y que nunca observa el detective!

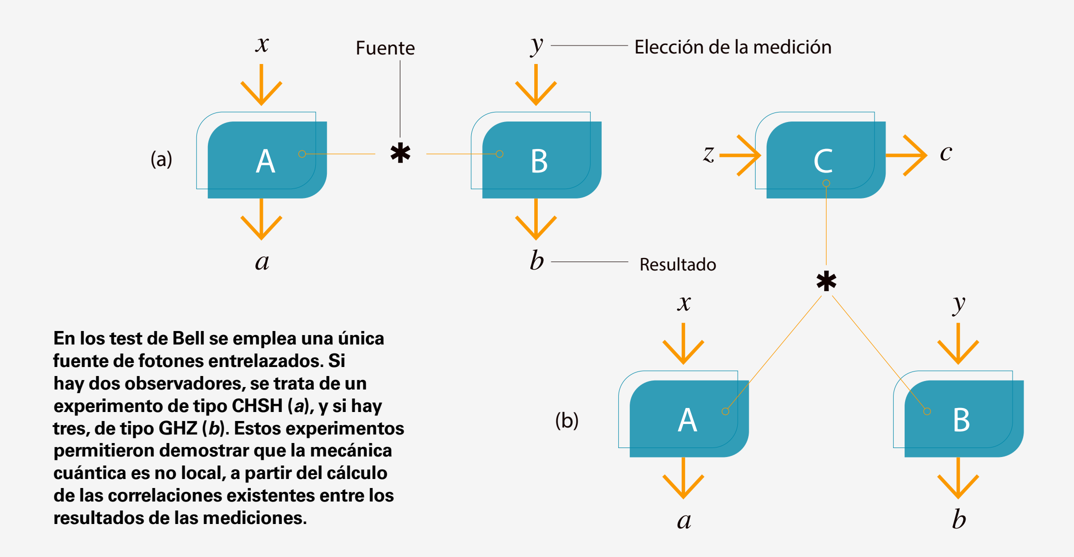
Analizando uno por uno los 64 casos posibles igual que acabamos de hacer con uno concreto, nuestro detective (o un lector motivado) puede demostrar fácilmente que ninguna de esas configuraciones clásicas es compatible con los resultados que indica la física cuántica. Para cada posible combinación de colores, siempre hay una elección de medidas que es incompatible con los resultados predichos por la mecánica cuántica y observados por el detective. Por tanto, ninguna de esas combinaciones puede explicar los resultados del experimento.

La conclusión inevitable es que la causa de las correlaciones entre las mediciones no puede ser de naturaleza clásica y es necesariamente no local. Sin embargo, para llegar a tal conclusión hay que admitir la hipótesis de la libertad de elección. Este supuesto descarta la existencia de una causa común que determine tanto el color de los gatos como los resultados de los lanzamientos de moneda. Una causa así podría impedir que las tres científicas observaran las situaciones problemáticas, como cuando todas miden el pelo de los gatos en el ejemplo considerado.



En el experimento GHZ, una única fuente (1) envía tres gatos en un estado «máximamente entrelazado» a tres investigadoras (2). Cada una lanza una moneda al aire (3) sin comunicar el resultado a sus compañeras. El lanzamiento determina si la investigadora mide el color de los ojos o el del pelo (4). Los posibles resultados son «rosa» o «verde» (5) y siguen ciertas reglas deducidas de la mecánica cuántica.

Un detective (6) armado con su intuición clásica intenta explicar el experimento. Sin conocer la naturaleza de la fuente, deduce que esta envía tres objetos (también los llama «gatos») con colores ya definidos (7). Pero los resultados que arroja su planteamiento son incompatibles con las predicciones de la mecánica cuántica y con las observaciones para cualquier posible combinación de colores de los gatos.



En los test de Bell se emplea una única fuente de fotones entrelazados. Si hay dos observadores, se trata de un experimento de tipo CHSH (*a*), y si hay tres, de tipo GHZ (*b*). Estos experimentos permitieron demostrar que la mecánica cuántica es no local, a partir del cálculo de las correlaciones existentes entre los resultados de las mediciones.

POUR LA SCIENCE

Durante varios decenios, ningún argumento teórico o experimento permitió resolver esta controversia, que la mayoría de los físicos ignoraban porque no afectaba a su trabajo diario. En 1964, el norirlandés John Bell realizó un avance crucial. Mientras buscaba una teoría que conciliara las predicciones de la mecánica cuántica con lo que ahora llamamos localidad, demostró justo el resultado opuesto. Eso condujo a uno de los teoremas más importantes de la física fundamental y revolucionó nuestra visión del mundo. Reformulado en la década siguiente, ese teorema prueba que ninguna teoría que genere las mismas predicciones que la física cuántica puede ser compatible tanto con el principio de localidad como con el de la libertad de elección. El teorema abrió la puerta a unos experimentos concretos, los llamados «test de Bell», que refutan la confluencia de esos dos principios.

En realidad existen muchos test de Bell. El que discutió el propio Bell era un experimento mental, sin ninguna indicación sobre la manera de llevarlo a cabo con los medios técnicos de la época. Ahora se conoce como test CHSH, en honor a los físicos estadounidenses John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony y Richard Holt, quienes propusieron el primer procedimiento experimental. Este se basa en dos personas que efectúan mediciones en dos lugares distintos y tiene la ventaja de ser relativamente fácil de implementar.

La idea consiste en analizar las correlaciones entre los resultados que miden los dos experimentadores. Si esas correlaciones son lo bastante fuertes, por encima de un cierto valor umbral (su fuerza viene dada por una «desigualdad de Bell»), entonces es imposible explicarlas clásicamente preservando tanto la localidad como la libertad de elección. Pero, en el marco del test CHSH, el razonamiento es complejo y no expone de manera sencilla la necesidad de la no localidad.

Otro test de Bell, llamado GHZ por los físicos que lo concibieron (Daniel Greenberger, Michael Horne y Anton Zeilinger), es muy interesante porque el razonamiento asociado muestra a las claras la insuficiencia de la intuición clásica. Por supuesto, hay que dominar el formalismo cuántico para calcular los resultados predichos en el marco del experimento GHZ. Pero si aceptamos esas predicciones, es bastante fácil comprobar que resultan incompatibles con los principios de localidad y de libertad de elección.

Gatos cuánticos

En sus realizaciones concretas, el experimento GHZ suele basarse en fotones cuya polarización hay que medir. Sin embargo, como los fotones no nos resultan demasiado familiares y en principio podemos emplear cualquier objeto que obedezca las leyes cuánticas, tomaremos la decisión (arbitraria) de llamar a esos objetos «ga-

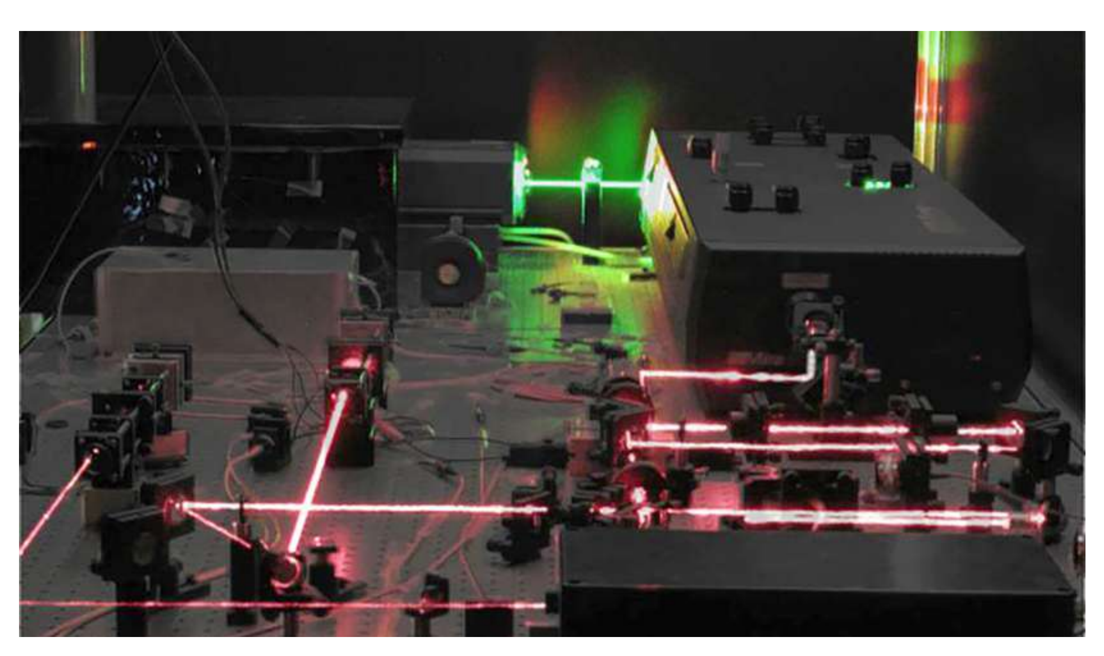
tos» y sustituir el estado de polarización por un color, manteniendo las mismas leyes cuánticas. En esta versión figurada del experimento, podremos medir el color del pelo (*P*) o de los ojos (*O*) de los gatos, para obtener como resultado verde (*v*) o rosa (*r*).

Describamos el experimento, reformulado en términos de gatos y colores. Una fuente crea tres gatos cuánticos en un estado físico bien definido. A continuación, se envían a tres aparatos de medida situados en tres laboratorios distantes entre sí. Tres científicas (llamémoslas Ana, Beatriz y Carmen) controlan esos aparatos y miden simultáneamente, o bien el color del pelo, o el de los ojos, conscientes de que las leyes del mundo cuántico impiden determinar ambos atributos a la vez. Cada una elige la propiedad que medirá de forma independiente y sin informar a sus compañeras. En concreto, cada experimentadora lanza una moneda al aire para decidir si mide el color de los ojos o el del pelo.

Para este experimento GHZ, la mecánica cuántica predice lo siguiente. Cuando todas las científicas midan *P*, obtendrán un número impar (1 o 3) de resultados *v*, y por lo tanto un número par (2 o 0) de resultados *r*. Cuando una mida *P* y las otras dos midan *O*, hallarán un número par (0 o 2) de resultados *v*, y en consecuencia un número impar (3 o 1) de resultados *r*. La mecánica cuántica también pronostica lo que ocurrirá cuando todas midan *O*, o cuando una mida *O* y las otras dos midan *P*, pero estas dos situaciones no son relevantes para estudiar la no localidad cuántica (en un test GHZ real, las propiedades *O* y *P* no son intercambiables). Al realizar el experimento un gran número de veces, las investigadoras verifican las predicciones de la mecánica cuántica que acabamos de enunciar.

Imaginemos ahora que un detective observa el experimento. De acuerdo con sus capacidades deductivas, derivadas de su experiencia del mundo macroscópico, busca una «explicación clásica» para los resultados, apoyándose en los principios de localidad y libertad de elección. En concreto, puede partir del supuesto de que los lanzamientos a cara o cruz no están sujetos a ninguna influencia.

El detective no sabe cómo funciona el experimento. Solo tiene acceso a los sucesivos lanzamientos de moneda de las científicas y a los resultados de sus mediciones. Y eso le permite constatar que se cumple lo previsto por la teoría en los dos casos que hemos expuesto. Así pues, se percata de que los resultados de las tres científicas están correlacionados.



UNIVERSIDAD DE GINEBRA

Los test de Bell se realizan con láseres y distintos sistemas ópticos. Para garantizar que el experimento no presenta una «laguna» de comunicación y demostrar que la física cuántica es no local, a veces los detectores se instalan en edificios distantes y se conectan a la fuente mediante fibras ópticas.

El gato de Schrödinger y la barrera de las palabras



Una de las dificultades de la física cuántica es expresar con palabras los fenómenos observados. El gato de Schrödinger y los del test GHZ son buenos ejemplos de ello. Si un individuo (un detective) trata de interpretar este último experimento a partir de su visión clásica, aplicará su intuición macroscópica y su vocabulario. Así, según su razonamiento, cuando un gato accede a uno de los túneles del experimento, su pelo es verde *o* rosa (donde la «o» es exclusiva). Esto se llama principio de realismo: dado que el color del pelo es una propiedad medible, que puede ser verde o rosa, cualquier pelo tiene en todo momento un color bien definido, verde *o* rosa.

En física cuántica, ese tipo de razonamiento deja de ser válido. El color del pelo de un gato cuántico es medible, pero no tiene sentido preguntarse cuál es mientras viaja por el túnel: el color no adquiere realidad hasta que se mide. En concreto, ya no es posible argumentar como el detective, considerando sucesivamente todos los colores posibles. Así pues, hay que inventar una nueva palabra para caracterizar la propiedad «color del pelo» antes de medirla. Como la palabra «*o*» ya se utiliza, los físicos emplean «*y*», que tiene la ventaja de que aún no posee ningún significado en este contexto. De este modo, decimos que el pelo del gato que atraviesa el túnel es verde *y* rosa. Esta es la misma «*y*» que encontramos en el famoso ejemplo del gato de Schrödinger: el gato está «vivo *y* muerto», porque podemos hallarlo vivo o muerto al abrir la caja; pero antes de abrirla no está vivo con una cierta probabilidad *o* muerto con la probabilidad complementaria. Así, esta «*y*» solo tiene sentido porque se opone a «*o*». También usamos el término «superposición» y escribimos que el color se encuentra en una superposición de los estados rosa y verde.

El gato de Schrödinger, vivo *y* muerto en su caja, constituye una imagen de lo que podemos ver en el formalismo de la física cuántica (que ofrece una caracterización más precisa y cuantitativa de lo que significa esa «*y*»). El test de Bell va más allá. Demuestra que un razonamiento clásico efectuado exclusivamente a partir de la palabra «*o*» es incompatible con las observaciones, y que necesitamos la palabra «*y*» para explicar el experimento.

Solo hay dos maneras de explicar esas correlaciones: o bien los resultados que arrojan los aparatos de medida están conectados por una misma causa, o bien algunos de esos aparatos se comunican entre sí (por ejemplo, el dispositivo de Ana podría enviar la información sobre la elección de esta investigadora al experimento de Beatriz). Sin embargo, como las mediciones se realizan de forma perfectamente simultánea y en lugares distintos, la segunda explicación es incompatible con el principio de localidad: la información no tiene tiempo de viajar entre los aparatos de medida. Por consiguiente, los resultados deben tener una causa común.

Así, el detective puede hacer una primera deducción. Sin asumirlo *a priori*, infiere que hay una única fuente que envía objetos a los tres aparatos de medida. El detective no conoce la naturaleza de esos objetos, pero sabe que poseen ciertas propiedades (P y O, cada una de las cuales vale v o r), ya que las tres investigadoras las miden. Y puede referirse de forma arbitraria a los objetos como «gatos», y a los atributos como «pelo» y «ojos», con valores «verde» y «rosa».

En su intento por hallar una explicación clásica, el detective enumera todas las posibles configuraciones con tres gatos, sabiendo que existen cuatro tipos de felinos (verde con ojos verdes, verde con ojos rosas, rosa con ojos verdes y rosa con ojos rosas). Contabiliza $4^3 = 64$ configuraciones en total. El detective analiza cada una de ellas, considerando los posibles resultados de los lanzamientos de moneda. Así descubre que, sea cual sea la configuración de los gatos recibidos por las investigadoras, siempre hay una combinación de mediciones para la cual las expectativas clásicas entran en conflicto con las observaciones; es decir, no se ajustan a las propiedades de paridad enunciadas más arriba. Por ejemplo, si suponemos que Ana recibe un gato rosa con ojos verdes, que Beatriz y Carmen reciben gatos verdes con ojos rosas, y que los resultados de los lanzamientos de moneda les indican a todas que midan el pelo, cabría esperar 2 resultados v. En cambio, las observaciones muestran que el número de resultados v cuando todas miden el pelo siempre es 1 o 3.

En general, sea cual sea el color de los gatos medidos por las tres investigadoras, siempre surge una contradicción de este tipo. Así, el intento de explicación del detective no se sostiene, lo que le obliga a cuestionar el principio de la libertad de elección o el de localidad. Y la negación de cualquiera de ellos choca frontalmente con su intuición clásica.

Tres gatos máximamente entrelazados

En principio, no hay nada que nos indique cuál de esos principios debemos descartar. La interpretación histórica de la mecánica cuántica, conocida como «de Copenhague», rechaza el principio de localidad, y la gran mayoría de expertos comparten esa elección. Eso pone en entredicho nuestra visión inicial de tres gatos que viajan

cada uno por su túnel, y nos obliga a verlos como una sola entidad indisociable y no local. En términos técnicos, los tres gatos se encuentran en un estado entrelazado y, siendo más precisos, en un «estado máximamente entrelazado de tres qubits». (Un qubit, o bit cuántico, es la unidad de información cuántica.)

En los años sesenta, ese experimento GHZ con tres gatos (o tres fotones) estaba fuera de nuestras posibilidades técnicas, y aún hoy es difícil de implementar. Excitando cristales con láseres hay una cierta probabilidad de producir un par de fotones entrelazados, pero no existe ninguna fuente de tres fotones entrelazados que controlemos bien. Por eso los físicos experimentales prefieren el experimento CHSH, que permite llegar a las mismas conclusiones con solo dos científicas, Ana y Beatriz, que comparten dos «gatos cuánticos».

Desde la propuesta de Bell en 1964, el test CHSH se ha llevado a cabo en varias ocasiones. El primer experimento corrió a cargo de Stuart Freedman y John Clauser en 1972. Luego vendrían otros, como el del equipo de Alain Aspect en 1981 o el que dirigió uno de nosotros (Gisin) en Ginebra en 1998. Las limitaciones técnicas de estos primeros experimentos no permitían descartar la existencia de resquicios o «lagunas»: podía ser que los aparatos de medida, demasiado próximos, intercambiasen información, o que la cuantiosa pérdida de fotones en el circuito introdujese un sesgo en la muestra detectada. Las conclusiones sobre la no localidad se establecieron con la salvedad de esos posibles resquicios.

Por fin, desde 2015, toda una serie de experimentos han logrado la aprobación de la comunidad científica. Los avances técnicos han aportado soluciones a todas esas lagunas, y la probabilidad de que los resultados observados sean compatibles con los dos principios clásicos es bajísima: en uno de los experimentos se estimó inferior a 1 entre 10^{28}. La imposibilidad de conciliar la mecánica cuántica con el principio de localidad (o con la libertad de elección) está ya fuera de toda duda.

Aplicaciones cuánticas

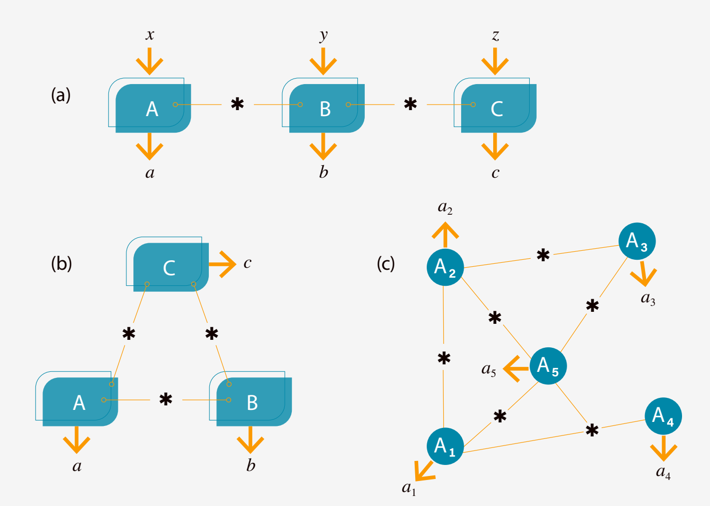
Los físicos no esperaron a estos últimos experimentos para explorar las posibilidades que ofrece la no localidad cuántica. Lejos de limitarse a una comprensión teórica del fenómeno, lo han empleado en diversas aplicaciones.

Por ejemplo, es posible usar la no localidad cuántica para obtener generadores de números realmente aleatorios. Los sistemas clásicos solo permiten simular el comportamiento aleatorio, y los números producidos son «pseudoaleatorios». Sin embargo, los generadores de números aleatorios son recursos cruciales para los algoritmos de optimización, la seguridad informática y los juegos de azar. En materia de seguridad, también es posible utilizar la no localidad cuántica para certificar el correcto funcionamiento de los dispositivos cuánticos, es decir, para garantizar la ausencia de vulnerabilidades que pudiera explotar un atacante. Y eso puede lograrse incluso si los dispositivos han sido fabricados o manipulados por alguien que no es de total confianza.

La no localidad cuántica también ha dado lugar a protocolos criptográficos que aseguran los mensajes frente a «cualquier ataque» (algo imposible en el mundo clásico). Este deseo de blindar las comunicaciones adopta la forma de una Internet cuántica que se basaría en el intercambio de fotones entrelazados. En comparación con los test de Bell que emplean una sola fuente de fotones, como el experimento GHZ, una red así representa un enorme desafío técnico. No es posible concebir una fuente que envíe fotones entrelazados a un gran número de usuarios y, además, Internet es por naturaleza una red descentralizada. Por lo tanto, la idea es utilizar varias fuentes independientes de fotones entrelazados, cada una de las cuales conectaría dos nodos de la red.

Desde un punto de vista teórico, esos sistemas cuánticos con varias fuentes independientes son radicalmente distintos a los de los experimentos GHZ o CHSH, así que cabe preguntarse qué ocurre con la no localidad en esa situación. Para estudiarlo, los investigadores comenzaron examinando las redes más simples posibles.

Consideremos primero el caso de una «sencilla» red triangular. Nuestro experimento cuántico sigue teniendo tres investigadoras, pero la fuente se sustituye por tres fuentes independientes situadas en cada lado del triángulo. Esta vez, cada física mide lo que le envían dos fuentes distintas a fin de obtener su resultado. Así, Ana recibe dos gatos cuánticos y realiza alguna medición que involucre a ambos (por ejemplo, puede examinar la paridad de los dos colores medidos, es decir, si son iguales o distintos). Beatriz y Carmen hacen lo mismo.



Las redes con varias fuentes independientes de fotones presentan una topología muy rica. En el experimento de bilocalidad (*a*) hay dos fuentes de fotones y tres observadores. El observador B realiza una medición simultánea de los dos fotones que recibe. En una red triangular con tres fuentes (*b*), cada uno de los tres observadores recibe dos fotones. Estas redes ya son difíciles de estudiar y la Internet cuántica tendrá muchas más fuentes independientes. En (*c*) apreciamos la complejidad de una red con tan solo seis fuentes.

Supongamos de nuevo que el detective se enfrenta a ese experimento y trata de explicarlo por medio de su intuición clásica. El detective sigue viendo correlaciones y sin conocer el funcionamiento interno del experimento. Y su primera deducción es la misma que en el test GHZ: las correlaciones deben surgir porque existe una causa, o una fuente, única. Reparemos en que el detective no tiene ninguna razón para limitar el número de gatos emitidos por esa fuente: así, para ceñirse a las observaciones, imaginará una única fuente que envía un «par de gatos» a cada científica. En consecuencia, la topología del experimento que imagina el detective no coincide con la real.

Para eliminar esa diferencia, decidimos «ayudar» al detective, indicándole la topología del experimento y el hecho de que las correlaciones provienen de una red con tres fuentes independientes que forman un triángulo. Entonces debe buscar un razonamiento compatible con la localidad, la libertad de elección y la topología experimental para explicar los resultados de las investigadoras. La disposición triangular impone nuevas restricciones que reducen drásticamente el número de posibles explicaciones del detective. Así, conociendo la topología, hay más razones para llegar a una contradicción.

El reto de las redes

Para el detective, sin embargo, el problema se torna mucho más difícil de analizar. La razón es matemática: con una sola fuente, las tres científicas pueden «coordinarse». Por ejemplo, imaginemos que tienen a su disposición un primer experimento basado en una fuente de gatos que se miden de una cierta forma, y un segundo experimento con otra fuente de perros, medidos de una manera distinta. Es posible usar esos dos experimentos para crear un tercero, donde una nueva fuente construida a partir de las dos anteriores envíe unas veces los gatos de la primera fuente y otras los perros de la segunda, así como una señal que les indique a las científicas qué tipo de medición realizar en cada ocasión.

El hecho de que pueda producirse esta coordinación implica que la estructura del espacio de posibles explicaciones es «convexa». Y eso permite explorar de manera bastante sencilla todas las estrategias posibles y demostrar que la experiencia observada por el detective es necesariamente no local.

En el caso de tres fuentes independientes, ese tipo de coordinación es imposible: en una red triangular, a partir de un experimento con gatos y otro con perros, no se puede crear uno nuevo que alterne gatos y perros (siempre llegará un momento en el que una fuente envíe gatos y otra perros al mismo tiempo). Así, el problema ya no es convexo: aunque hay menos estrategias posibles, explorarlas todas se vuelve muy complicado. Esa es la dificultad a la que se enfrentan los expertos en no localidad en redes: para una topología dada, ¿qué experimento (o estrategia) es no local y cómo demostrarlo?

Desde hace unos diez años, los físicos han ideado experimentos concretos para compren-

der mejor esta nueva forma de no localidad en redes. En 2010, Cyril Branciard, ahora en el Instituto Néel de Grenoble, y sus colaboradores —incluido uno de nosotros (Gisin)— concibieron un nuevo tipo de pruebas cuánticas que emplean dos fuentes independientes, los llamados test de «bilocalidad». El equipo imaginó un experimento basado en esa topología y demostró que los resultados esperados de las mediciones eran inexplicables para el detective. Ese experimento constituye un primer paso hacia una red con varias fuentes, aunque las correlaciones siguen siendo similares a las de los experimentos de tipo Bell. Otra limitación es que, en una red puramente cuántica, uno querría que las mediciones fueran entrelazadas. Se trata de una suerte de paralelismo con el entrelazamiento, pero aplicado a los aparatos de medida, que nos permitiría medir conjuntamente dos fotones entrelazados y determinar su estado.

La búsqueda de otros ejemplos llevó a los físicos a considerar la red triangular. En 2012, Tobias Fritz, que por entonces trabajaba en el Instituto de Ciencias Fotónicas de Barcelona, realizó un primer hallazgo importante. Inspirándose en el experimento CHSH estándar, donde solo intervienen dos científicas, logró construir un primer ejemplo de no localidad cuántica en la red triangular. En la práctica, en el test CHSH, Ana y Beatriz poseen generadores de números aleatorios (que desempeñan el papel de los lanzamientos de moneda). La idea consiste simplemente en enviar los datos de esos generadores a una nueva científica, Carmen: así, las tres investigadoras están conectadas por tres fuentes (la «fuente CHSH» que comparten Ana y Beatriz, y los dos generadores de números aleatorios) que forman una red triangular. Se pide a cada una de las científicas que anuncie los números aleatorios que recibe (además del resultado del experimento CHSH, en el caso de Ana y Beatriz). A partir de las características concretas de este tipo de experimento, Fritz demostró que un detective que conozca la topología experimental podrá relacionar lo que observa con un test CHSH estándar, controlado por las desigualdades de Bell, y por tanto no encontrará ninguna explicación de los resultados que satisfaga el principio de localidad. De forma inesperada, este ejemplo de no localidad en una red triangular no recurre a la hipótesis de la libertad de elección, lo que demuestra que esta ya no es necesaria para la no localidad en redes: se ve reemplazada por la hipótesis de la independencia de las fuentes.

Estados superpuestos y mediciones entrelazadas

En la física cuántica hay «superposiciones de estados» que no se corresponden con nada conocido en nuestro entorno (un gato «vivo *y* muerto»). Asimismo, hay formas de medir los objetos, conocidas como «mediciones entrelazadas», que tampoco se corresponden con ninguna medición concebible en nuestro mundo clásico.

La imagen del gato de Schrödinger «vivo *y* muerto» ilustra el hecho de que cualquier propiedad cuántica medible puede ser una superposición de dos (o más) estados. Así, mientras un gato clásico puede hallarse en el estado «vivo» o en el estado «muerto», un gato cuántico puede estar (antes de que lo observemos) en el estado «vivo *y* muerto». Esta lógica es aplicable a otros contextos: el pelo del gato puede ser rosa *y* verde, el gato puede llegar por la izquierda *y* por la derecha. En realidad, el formalismo de la física cuántica ofrece una caracterización cuantitativa de esa «superposición»: para precisar completamente el estado del gato de Schrödinger, habría que decir, por ejemplo, que está en una «superposición máxima y positiva de los estados vivo *y* muerto». También podría estar en una «superposición máxima y negativa de los estados vivo *y* muerto». La diferencia entre estos dos estados, uno «positivo» y otro «negativo», indica lo que ocurre cuando los gatos, o los fotones, interfieren entre sí. Es una diferencia puramente cuántica y en consecuencia difícil de entender, pero esos estados son tan distintos entre sí como los estados «vivo» y «muerto», y pueden distinguirse fácilmente con la ayuda de mediciones.

Imaginemos ahora que una física llamada Ana recibe un único gato, que puede tomar dos caminos para llegar hasta ella: el de la izquierda o el de la derecha. Ana recibe el gato y se pregunta por dónde vino. En nuestro mundo clásico, no puede hacer mucho más que determinar el camino que tomó el gato: medirá si llegó por la izquierda o por la derecha. Pero la física cuántica permite realizar un nuevo tipo de medición que no tiene equivalente clásico: Ana, por ejemplo, puede medir si el gato llega en una «superposición máxima *y* positiva entre los caminos de la izquierda y de la derecha», o en una «superposición máxima *y* negativa entre los caminos de la izquierda y de la derecha».

Tras realizar esa medición, Ana no sabe si el gato tomó el camino de la izquierda o el de la derecha. Sin embargo, adquiere la misma cantidad de información sobre el «trayecto» que efectuó el gato para llegar hasta ella: dicha información reside en el término «positiva» o «negativa». Tenemos que inventar una palabra para referirnos a este nuevo tipo de medición.

Como el fenómeno está relacionado con la superposición, decimos que el gato (único) «viene de la izquierda *y* de la derecha» (de forma positiva o negativa, según el resultado de la medición). Algo similar ocurre cuando en vez de un solo gato en estado de superposición tenemos dos gatos entrelazados: también existe un nuevo tipo de medición propia de la física cuántica, que denominaremos «medición entrelazada».

Junto a varios colaboradores (Elisa Bäumer, Sadra Boreiri y Salman Beigi), estudiamos la red triangular simplificando el problema al máximo. Consideramos tres fuentes que enviaban estados entrelazados idénticos a tres observadores que realizaban el mismo tipo de medición. Como ya hemos mencionado, la elección del experimento y de la estrategia de medición es crucial: en todos los casos conocidos hasta entonces (a excepción del ejemplo de Fritz), o bien se obtenían correlaciones locales, o bien no se había podido demostrar la no localidad. Eligiendo las mediciones de forma adecuada, propusimos el primer ejemplo de un experimento cuántico no local con una red triangular donde la demostración de la no localidad se basa en un argumento independiente de los test de Bell habituales (con una sola fuente).

El experimento que propusimos es interesante porque intervienen todos los elementos que esperaríamos en una red cuántica: estados entrelazados y mediciones entrelazadas. Esas características, así como nuestra demostración, indican que dicho experimento podría ser esencialmente distinto a cualquier test de Bell estándar, como los experimentos CHSH o GHZ. Hay muchos argumentos que respaldan esta afirmación, pero aún falta probarla de manera formal.

Una red triangular todavía dista mucho de una red de Internet, pero este ejemplo ya presenta numerosos atractivos. Se trata de una red cerrada, una configuración muy difícil de tratar matemáticamente. Y al igual que el experimento de Fritz, prescinde de la hipótesis de la libertad de elección, lo que en principio permite ver este sistema como un generador de números aleatorios sin elección inicial de la medición. Esta característica, que aún hay que demostrar, vendría a costa de una hipótesis fuerte, la de la independencia de las tres fuentes en disposición triangular. Por último, del mismo modo que la no localidad de Bell ha permitido el desarrollo de diversas aplicaciones, parece razonable pensar que la no localidad en redes, ya sean triangulares o más complejas, dará lugar a usos específicos.

Desde sus comienzos, la mecánica cuántica no ha dejado de sorprendernos. Los trabajos en torno a la no localidad y la nueva no localidad en redes ilustran su naturaleza contraria a la intuición. Pero no son los únicos, y hay otros principios «evidentes» que parecen incompatibles con esta teoría. Por ejemplo, en 2018, Daniela Frauchiger y Renato Renner, de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, demostraron que en la mecánica cuántica no es evidente que sigan siendo válidos razonamientos muy sencillos del tipo «sé que *A* implica *B* y sé que mi amigo demostró *A*, así que sé que *B* es cierto».

Estos resultados tan perturbadores parecen capaces de volver loco a cualquier detective. ¿Es realmente razonable, o incluso posible, llevar a cabo una investigación en un mundo cuántico que trastoca nuestra intuición? Y ¿nunca lograremos desarrollar una intuición cuántica? Puede que la imagen del detective y sus hijos amantes de los videojuegos esconda una primera respuesta. Supongamos que el mismo detective, cansado de los asuntos del mundo cuántico, se encarga esta vez de una investigación del videojuego *Super Mario*. De nuevo, en ese mundo, un crimen puede parecerle inexplicable, rayando en lo absurdo. Las reglas que rigen los asesinatos (saltar sobre el adversario) son totalmente distintas a las suyas. ¡Pero a sus hijos les resultan familiares! Nuestro vocabulario y la intuición de lo que es posible o imposible, lógico o absurdo, provienen de lo que experimentamos y vemos. Vivir en la Tierra es lo que hace que el detective desarrolle su intuición, y jugar al *Super Mario* lo que hace que sus hijos dominen las reglas del juego. Del mismo modo, los experimentos mentales y reales son los que permiten a los científicos desarrollar una intuición del mundo de la física cuántica e inventar sus propias palabras para describir este nuevo «mundo real», que un día podría dar origen a la Internet cuántica.

Marc-Olivier Renou es investigador postdoctoral en el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de Barcelona.



Nicolas Gisin es profesor de la Universidad de Ginebra y del Instituto de Tecnología de Schaffhausen.



Nicolas Brunner es profesor de la Universidad de Ginebra.



EN NUESTRO ARCHIVO

La certeza del azar cuántico. Antonio Acín, Serge Massar y Stefano Pironio en *IyC*, enero de 2012.

Los límites físicos de la privacidad. Artur Ekert y Renato Renner en *IyC*, enero de 2016.

Un test de Bell sin escapatorias. Carlos Abellán, Waldimar Amaya y Morgan W. Mitchell en *IyC*, enero de 2016.

Acción fantasmal. Ronald Hanson y Krister Shalm en *IyC*, febrero de 2019.

JUEGOS MATEMÁTICOS

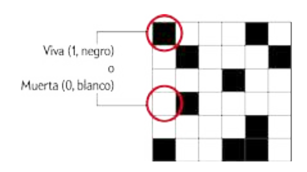
LA EVOLUCIÓN DEL JUEGO DE LA VIDA


John Horton Conway (1937-2020)

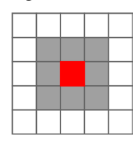
Bartolo Luque | Un recorrido por los desarrollos que ha experimentado el popular autómata celular de John Horton Conway a lo largo de los últimos años

El «juego de la vida» se popularizó hace décadas gracias a una columna escrita en 1970 por Martin Gardner en *Scientific American*. Su creador, el irrepetible matemático John Horton Conway, nos dejó por COVID-19 hace dos años. Esta sección le debía un homenaje y, aprovechando el nuevo formato digital de *Investigación y Ciencia*, les propongo una puesta al día de los desarrollos más sorprendentes que han logrado los entusiastas de este universo digital en los últimos 50 años. Para disfrutar por completo de la columna, les recomiendo que cliquen en los numerosos enlaces, muchos de los cuales remiten a sorprendentes animaciones que ilustran la insólita dinámica del juego.

El juego de la vida, o simplemente «vida», se juega sobre un tablero cuadriculado infinito. En un instante *t*, cada celda puede estar «viva» o «muerta», un estado que representaremos pintando la casilla correspondiente en negro o en blanco, respectivamente.

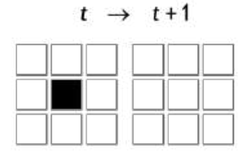


La celda modificará (o no) su estado en un paso de tiempo discreto, que llamaremos iteración o generación, en función del estado de sus celdas vecinas. En el juego de la vida se usa la llamada «vecindad de Moore», marcada en gris en la siguiente imagen:

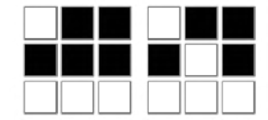


Las reglas que deben seguirse son:

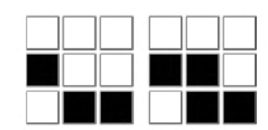
(1) Fallecimiento por aislamiento: Una célula viva muere si no tiene ninguna vecina viva o si solo tiene una.



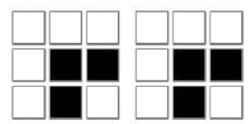
(2) Fallecimiento por hacinamiento: Una célula viva muere si tiene 4 o más vecinas vivas.



(3) Nacimiento: En una celda vacía con exactamente 3 vecinos vivos, nace una célula.



(4) Supervivencia: Una célula viva con 2 o 3 vecinas vivas sigue viva.



Estas cuatro reglas pueden resumirse en una sencilla frase: solo 3 para nacer, y 2 o 3 para sobrevivir.

En las imágenes anteriores solo hemos computado y dibujado el estado que tendrá la celda central en $t + 1$ en función de los estados de sus celdas vecinas en el instante t. Podríamos cambiar su estado y luego tomar otra celda del tablero al azar, aplicarle las reglas, y así sucesivamente. Estaríamos aplicando entonces las reglas de forma asíncrona. Sin embargo, en el juego de la vida se aplican las reglas a todas las celdas al mismo tiempo: se computa de forma síncrona. Para simularlo, podemos usar dos tableros, uno donde tenemos la configuración actual y otro donde vamos anotando celda a celda la configuración futura. Cuando hayamos computado todos los futuros valores, cambiamos el tablero actual por el futuro y repetimos.

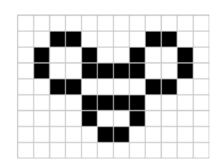
Naturalezas muertas y osciladores

Por ejemplo, para la configuración en gris de la imagen inferior, conocida como bloque, calculamos el número de vecinos vivos que tiene cada celda (los números de la imagen, el resto de las celdas en blanco tienen toda su vecindad a cero y seguirán en blanco) y, aplicando las reglas, reactualizamos los estados de las celdas. ¿Qué ocurre en este caso?

	1	2	2	1	
	2	3	3	2	
	2	3	3	2	
	1	2	2	1	

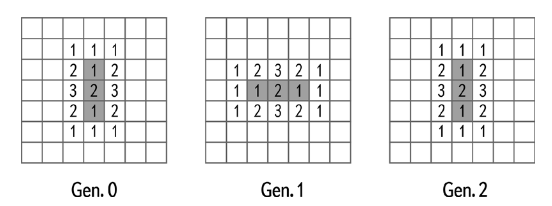
La configuración permanece inalterada, por lo que diremos que estamos frente a una «naturaleza muerta». En su famosa columna de 1970, Gardner presentó varias de estas estructuras estables de sugerentes nombres.

Las naturalezas muertas forman la categoría de patrones más extensa del juego de la vida. Podemos comprobarlo en ConwayLife.com, la web más completa sobre el juego, que incluye una exhaustiva Wiki y un activo foro. Ahí podemos consultar las subcategorías en que se dividen estos patrones, sus detalles de uso o los últimos descubrimientos, como por ejemplo Mickey Mouse, una naturaleza muerta de 26 células encontrada por Mark Niemiec en 2021:



Para familiarizarse con las reglas de vida, les recomiendo que computen a mano, como hemos hecho con el bloque, el resultado final de la evolución de todas las posibles configuraciones iniciales de tres células vivas conectadas. Si descarta las configuraciones iniciales simétricas, solo debe hacerlo para 5 configuraciones realmente distintas.

Uno de los patrones que habrá tenido que calcular se denomina intermitente. Abajo aparece en gris en sucesivas generaciones:



Sorprendentemente, el patrón oscila con período 2. Martin Gardner presentó también en su artículo muchos ejemplos de osciladores, como el semáforo, formado por cuatro intermitentes, o el pentadecatlón, de período 15.

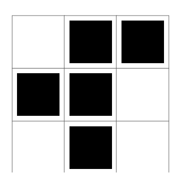
Todas estas configuraciones fueron encontradas por los primeros grupos de entusiastas del juego de la vida. Cincuenta años después se conocen una enorme cantidad de osciladores, y se ha demostrado que existen de todo tipo excepto de períodos 19, 38 o 41. Y aún hoy se siguen descubriendo: el primer oscilador de período 23 fue hallado en 2019 por Luka Okanishi, que lo bautizó como David Hilbert, en homenaje a la famosa lista de 23 problemas de Hilbert.

El deslizador y otras naves

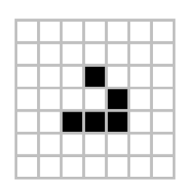
En el juego de la vida podemos predecir el futuro de ciertos patrones. Por ejemplo, resulta sencillo determinar el destino de una cadena diagonal de células vivas de longitud n, ¿verdad? Sin embargo, a pesar de que las reglas son deterministas y muy sencillas, en general no sabemos predecir el resultado final de la evolución de configuraciones tan elementales como segmentos de n células.

Conway escogió las reglas del juego de la vida porque no resultaba evidente a partir de ellas la existencia de un patrón que creciera sin límite. Pero el juego superó las expectativas de su creador: a pesar de la sencillez de las reglas deterministas, este universo digital resultaba misterioso e impredecible. En analogía con nuestro universo, el mensaje que nos ofrece el juego de la vida es que conocer todas las leyes que lo rigen no implicaría necesariamente que dejara de resultarnos misterioso e impredecible. La prueba más convincente de esta afirmación fue el inesperado descubrimiento del deslizador.

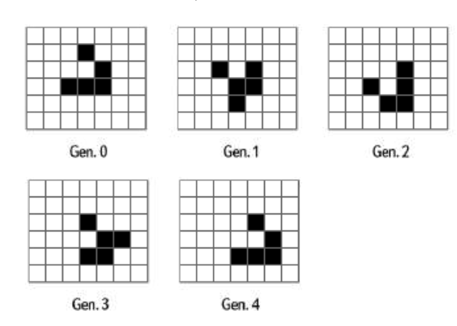
En 1969, Conway y colaboradores jugaban a vida a la hora del té sobre un tablero de go, moviendo manualmente las fichas. Con paciencia, Richard K. Guy estaba desarrollando la evolución del patrón de 5 células llamado pentominó-R.



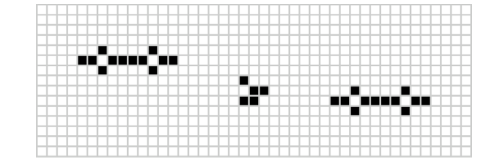
Esta aparentemente inofensiva configuración seguía activa después de 460 generaciones y Conway predijo: «Ha dejado por ahí un montón de residuos y detritus y tiene tan solo unas cuantas regiones activas, por lo que no parece que vaya a sobrevivir indefinidamente». Las sesiones de té siguieron y, durante una de ellas, Guy hizo un gran descubrimiento: «¡Venid aquí! ¡Este patrón parece que camina!». Despuntando del magma surgió un *glider* («deslizador»), el primer organismo de vida con capacidad de movimiento.



Conway definió la velocidad en vida como el número de celdas que avanzaba una configuración hasta repetir su forma, dividido por el número de iteraciones transcurridas. La máxima velocidad de desplazamiento de cualquier movimiento en el tablero es entonces de una casilla por paso de tiempo, o la velocidad de desplazamiento del rey en el ajedrez, que Conway llamó «velocidad de la luz», c. Por tanto, los deslizadores reptan en la dirección de los alfiles del ajedrez a velocidad $c/4$.

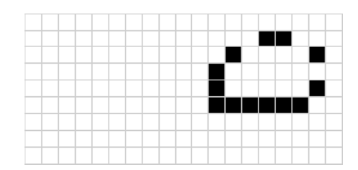


La existencia de deslizadores y otras configuraciones estables capaces de trasladarse, conocidas genéricamente como «naves», acabaron de convencer a la comunidad de vitalistas de la imposibilidad de predicción en vida. Pero, al mismo tiempo, proporcionó una cascada de descubrimientos que convirtió a vida en algo más interesante que un sencillo juego. Por ejemplo, el descubrimiento de los deslizadores permitió construir osciladores de período arbitrario. En la siguiente imagen vemos un oscilador de período 60 formado por dos pentadecatlones que juegan al tenis con un deslizador:



Si separamos más los pentadecatlones podemos lograr cualquier período de valor $60 + 120n$. Esta es la prueba más simple de la existencia de osciladores de período arbitrariamente grande.

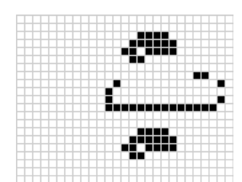
Después del deslizador se descubrieron a mano otras naves, como esta «nave pesada»:



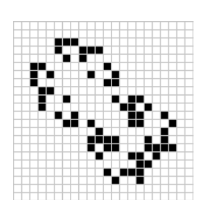
Las naves con diseño semejante pero mayor eslora resultaron ser inestables. Conway demostró que la longitud del cuerpo recto de las naves espaciales no puede sobrepasar las 6 celdas, ya que si no generan residuos que bloquean su propio movimiento (¿puede demostrarlo?).

¿Cómo se podría aumentar el tamaño de las naves sin que se autodestruyeran por sus propios residuos? Mediante «flotillas»: grupos de naves

que escoltan en paralelo a otra mayor y evitan así el problema de los residuos. La siguiente imagen es un ejemplo de flotilla formada por una nave superpesada y escoltada por dos naves pesadas. La flotilla viaja en el sentido del vector (–1, 0) a velocidad *c*/2.



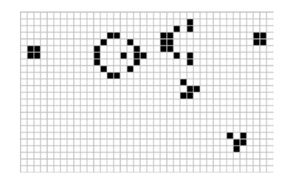
Desde el nacimiento por serendipia del deslizador se han descubierto y diseñado cientos de naves. Por ejemplo, el gran deslizador fue encontrado por el matemático Dean Hickerson en 1989. Después del deslizador, fue la segunda nave con movimiento diagonal. ¿A qué velocidad se mueve?



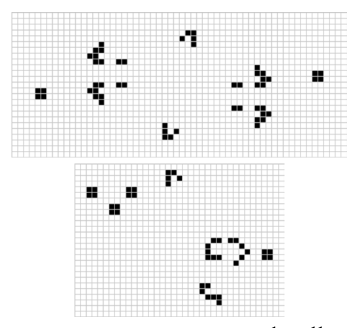
El cañón de Gosper y otras armas

Desde sus inicios, hubo dos maneras muy distintas de explorar vida. Una consistía en generar configuraciones iniciales al azar, estudiar su evolución y «pescar» nuevos patrones. La segunda ha sido la opción mayoritaria de la comunidad vitalista, un enfoque ingenieril: diseñar patrones complejos a partir de otros más sencillos.

Cuando Conway conjeturó que ninguna configuración podría crecer ilimitadamente y ofreció 50 dólares por probar o refutar la conjetura, R. William Gosper Jr. diseñó otro de los patrones inesperados de vida, el cañón de deslizadores:



El cañón de Gosper repite el lanzamiento de un deslizador cada 30 iteraciones. De esta forma, sobre un tablero infinito, la población crece de forma ilimitada. Desde su creación se han diseñado una multitud de estructuras semejantes, conocidas genéricamente como armas. Aquí podemos ver dos ejemplos: ***bi-gun***, que dispara dos chorros de deslizadores en sentidos opuestos, y el cañón Simkin, descubierto en 2015 y la última incorporación a la lista de cañones de planeadores.



Para experimentar y ver con detalle cómo están formados y evolucionan todos los patrones que hemos presentado y disfrutar más a fondo lo que sigue, les recomiendo que se instalen el simulador del juego de la vida llamado Golly. Si tras clicar en el enlace e instalar el programa clica sucesivamente en *File/Open Patterns/Life*, se encontrará con una ingente cantidad de patrones pregrabados. Curiosee en *Still-lifes*, *Oscillators* y *Guns* para ver más ejemplos de naturalezas muertas, osciladores y cañones.

Los cañones que hemos visto hasta ahora generan un crecimiento de deslizadores lineal. Si abre ***Breeders*** en Golly, se encontrará con un repertorio de patrones conocidos genéricamente como reproductores. Los reproductores crean deslizadores a un ritmo cuadrático: son una combinación de naves diseñada de modo que sus propios residuos formen cañones de manera regular.

Dado que los cañones se crean a un ritmo lineal y estos producen deslizadores también a un ritmo lineal, el patrón crece cuadráticamente. En Golly encontrará *spacefiller.rle*, una proliferadora donde el crecimiento cuadrático es más evidente todavía.

Síntesis por colisiones

Por supuesto, desde el instante en que se descubrieron los deslizadores se empezaron a explorar los resultados de sus colisiones bajo distintos ángulos. En el fichero *two-glider-collisions.rle* de la carpeta *Life/Syntheses* de Golly puede ver en una sola pantalla el resultado de los 71 posibles choques entre dos deslizadores. La mayoría de las colisiones acaban con la aniquilación mutua o en naturalezas muertas. Pero hay dos reacciones muy especiales: una que produce que un deslizador rebote 90 grados (kickback reaction),

mientras que el otro desaparece y una segunda reacción de rebote idéntica, pero de 180 grados.

Desde estos primeros estudios se han encontrado una gran variedad de maneras de redirigir naves. Por ejemplo, el reflector de naves Snark consigue reflejar 90 grados un *glider*. Descubierto por Mike Playle en 2013, es el reflector más rápido y pequeño que se conoce. Se compone de cinco naturalezas muertas: un bloque, un 31.4 (la estructura arrugada de arriba a la derecha) y dos devoradores. Si un deslizador entra de la forma adecuada, su sentido de movimiento cambia 90 grados y la estructura permanece inalterada.

El devorador es una naturaleza muerta que tiene la capacidad de desintegrar una gran diversidad de configuraciones y no destruirse. Si vuelve a observar el cañón Simkin, comprobará que estaba presente devorando un deslizador tras otro en cuatro iteraciones. Existe toda una variedad, pero este es el devorador de planeadores más rápido y pequeño. Como tal, aparece como estabilizador en la esquina de muchos osciladores. Por cierto, ¿qué ocurrirá si enfrentamos dos devoradores?

Hay patrones que «fabrican» otros patrones. Por ejemplo, se llama síntesis de deslizadores a la construcción de un patrón como resultado de sus colisiones. Poco después de descubrir el cañón, Gosper encontró una configuración de ocho deslizadores capaz de formar un cañón como resultado de sus choques. Podemos visualizarlo en Golly si descargamos el fichero *gosperglidergun_synth.rle*.

Hoy los ingenieros vitalistas son capaces de construir mediante síntesis de deslizadores todas las naturalezas muertas y osciladores conocidos con un máximo de 18 y de 14 celdas, respectivamente.

Criba de primos

Las construcciones que acabamos de ver no dejan indiferente a nadie. Pero, personalmente, recuerdo el impacto que me causó la construcción, a principios de los años 90, de un calculador de números primos en el juego de la vida.

Para comprender cómo esto es posible, solo nos falta un ingrediente: conseguir chorros de planeadores de períodos arbitrarios. Como un cañón produce un deslizador cada 30 iteraciones, y un deslizador se desplaza en diagonal una unidad cada 4 iteraciones, en el chorro que forman quedan equiespaciados 30/4 = 7,5 celdas en diagonal. Es posible crear un chorro donde los deslizadores estén espaciados el doble, el triple o cualquier múltiplo de esta distancia.

La criba de Eratóstenes nos permite generar la lista de los números primos como supervivientes de la eliminación de sucesivos múltiplos. En 1991, Dick Hickerson aprovechó la posibilidad de generar chorros de naves de cualquier período y la de aniquilación por colisión para implementar una criba de Eratóstenes en el juego de la vida.

Hickerson llamó a su construcción Primer. Este diseño logra una secuencia de naves ocupando las posiciones primas de un chorro. Para conseguirlo, se eliminan por colisión las naves que ocupan posiciones no primas en la secuencia, emulando la criba de Eratóstenes. Puede consultar detalles desde la página dedicada a Primer en la wiki de Conwaylife. Allí puede ver un vídeo, simularlo en línea con LifeViewer o descargar el fichero *primer.rle* para verlo en Golly y hacer *zoom* para deleitarse en sus detalles.

La nueva generación de ingenieros vitalistas sigue siendo muy activa y ha alcanzado niveles de frikismo acordes a la era de Internet. Sirva como muestra final un reloj digital creado hace cinco años y cuya construcción puede seguirse en StackExchange.

Si todo esto le ha parecido sorprendente y algo loco, se trata solo del principio. En la segunda parte de esta entrega veremos hasta dónde han llegado los ingenieros de vida explotando la capacidad de computación universal que Conway y sus colaboradores demostraron que tenía este sencillo universo digital. Eso sí que es friki.

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



PARA SABER MÁS

Game of life cellular automata. Dirigido por Andrew Adamatzky. Springer, 2010.

John Conway, el genio mágico. Pedro Alegría y Fernando Blasco en *La Gaceta de la RSME*, vol. 23, págs. 463-486, 2020.

Golly: http://golly.sourceforge.net

ConwayLife: https://conwaylife.com

EN NUESTRO ARCHIVO

El juego de la vida. Agustín Rayo en *IyC*, diciembre de 2010.

El juego de la vida. Martin Gardner en *El universo matemágico de Martin Gardner*, colección TEMAS de *IyC*, n.º 77, 2014.